



TUGAS AKHIR - MO141326

ANALISIS TEGANGAN DAN KELELAHAN AKIBAT PENGARUH
VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) YANG TERJADI PADA
LOKASI *CROSSING PIPELINES*
STUDI KASUS : KILO *FIELD* MILIK PERTAMINA HULU ENERGI
OFFSHORE NORTH WEST JAVA

IDHAM AULIA M. BASIR

NRP. 4310 100 098

Dosen Pembimbing:

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Ir. Handayanu, M.Sc, Ph.D.

JURUSAN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Tekonolgi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya 2015



FINAL PROJECT - MO141326

STRESS AND FATIGUE ANALYSIS CAUSED BY THE EFFECT OF
VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) ON CROSSING PIPELINES
STUDY CASE : KILO FIELD PERTAMINA HULU ENERGI
OFFSHORE NORTH WEST JAVA

IDHAM AULIA M. BASIR

REG. 4310 100 098

Supervisors:

Ir. Imam Rochani, M.Sc.

Ir. Handayanu, M.Sc, Ph.D.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya 2015

**ANALISIS TEGANGAN DAN KELELAHAN AKIBAT
PENGARUH *VORTEX INDUCED VIBRATION* (VIV) YANG
TERJADI PADA LOKASI *CROSSING PIPELINES*
STUDI KASUS : KILO *FIELD* MILIK PERTAMINA HULU
ENERGI *OFFSHORE NORTH WEST JAVA***

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Progran Studi S-1 Jurusan Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

Idham Aulia M. Basir

NRP. 4310 100 098

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Imam Rochani M. Sc. (Pembimbing 1)
2. Ir. Handayanu, M. Sc., Ph.D. (Pembimbing 2)



Surabaya, Januari 2015

ANALISIS TEGANGAN DAN KELELAHAN AKIBAT PENGARUH *VORTEX INDUCED VIBRATION* (VIV) YANG TERJADI PADA LOKASI *CROSSING PIPELINES*; STUDI KASUS : KILO *FIELD* MILIK PERTAMINA HULU ENERGI *OFFSHORE NORTH WEST JAVA*

Nama Mahasiswa : Idham Aulia M. Basir
NRP : 4310100098
Jurusan : Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Dosen Pembimbing : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRAK

Dalam sistem perpipaan bawah laut, salah satu permasalahan utama yang sangat dihindari adalah *free span*. *Free span* tersebut rentan mengalami kegagalan struktur, seperti kelelahan, yang disebabkan oleh vibrasi yang terjadi oleh *vortex shedding* atau biasa disebut fenomena *vortex induced vibration* (VIV). Fenomena disebabkan oleh beban lingkungan terutama gelombang dan arus laut, hingga *rasio gap seabed* (e/D) dan kekasaran dari pipa (k/D). Pada tugas akhir ini, analisis *free span* yang dilakukan terdiri analisis tegangan dari *pipelines*, analisis dinamis *free span*, serta analisis kelelahan. Berdasarkan hasil perhitungan tegangan, didapatkan keluaran berupa **tegangan ekuivalen** sebesar **116.01 MPa** dan masih memenuhi tegangan yang diijinkan berdasarkan ASME B.31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distribution Piping System*. Untuk hasil perhitungan dari analisis dinamis, keluaran yang dihasilkan berupa panjang efektif untuk **arah *cross-flow*** sebesar **19.79 m** dan arah ***in-line*** sebesar **20.25 m**, namun yang dijadikan **panjang span yang diijinkan** adalah dari arah *cross-flow* karena mengambil nilai yang terkecil dari keduanya. Sedangkan untuk analisis kelelahan, perhitungan hanya dilakukan pada arah *in-line* dan didapatkan ***fatigue life* (T_{life})** yaitu lebih dari **33 tahun** dengan jumlah kerusakan yang terjadi (D) sebesar **1.901×10^{-8}** . Adapun acuan validasi yang digunakan dalam analisis dinamis dan kelelahan dari *free span* adalah DNV-RP-F105 mengenai *Free Spanning Pipelines*.

Kata kunci : *free span*, analisis tegangan, *cross-flow*, *in-line*, VIV, *allowable span*, *fatigue life*

**STRESS AND FATIGUE ANALYSIS CAUSED BY THE EFFECT OF
VORTEX INDUCED VIBRATION (VIV) ON CROSSING PIPELINES;
STUDY CASE : KILO FIELD PERTAMINA HULU ENERGI OFFSHORE
NORTH WEST JAVA**

Student Name : Idham Aulia M. Basir
Reg. : 4310100098
Department : Ocean Engineering
Faculty of Marine Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Supervisor : Ir. Imam Rochani, M.Sc.
Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

ABSTRACT

In the subsea pipeline system, one of the main problems that very avoided is free span. Free span is prone to structural failure, such as fatigue, caused by vibrations that occur by vortex shedding or commonly called the phenomenon of vortex induced vibration (VIV). This phenomenon caused by environmental loads, especially waves and ocean currents, or the effect from seabed gap ratio (e/D) and roughness of pipe (k/D). In this thesis, the free span analysis that we performed consist of **the pipelines stress analysis, dynamic analysis of free span, and fatigue analysis of free span**. Based on the results of stress calculations, we obtain the output of **the equivalent stress is 116.01 MPa** and still include in value which is determined of the allowable equivalent stress by ASME B.31.8.2000 on Gas Transmission and Distribution Piping Systems. For the calculation of free span dynamic analysis, the resulting output is **the effective length of free span in cross-flow direction equal to 19.79 m and the in-line direction equal to 20.25 m**. But for the allowable span length, we used the value from cross-flow direction because that is the smallest value from both. Whereas of result of the fatigue analysis of free span, we obtain **the value of fatigue life (T_{life}) is more than 33 years**, with the total of damage that occurred (D) is about **1.901x10⁻⁸**. And the reference of validation that used in dynamic and fatigue analysis the free span is DNV-RP-F105 about Free Spanning Pipelines.

Keywords : free span, stress analysis, cross-flow, in-line, fatigue life, VIV, allowable span

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah, tiada henti-hentinya penulis menghaturkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT untuk segala nikmat, rahmat, dan hidayah-Nya sehingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan lancar. Adapun judul dari Tugas Akhir ini adalah **“Analisis Tegangan dan Kelelahan Akibat Pengaruh *Vortex Induced Vibration* (VIV) yang Terjadi pada Lokasi *Crossing Pipelines*; Studi Kasus : Kilo Field Milik Pertamina Hulu Energi *Offshore North West Java*”**

Perlu diketahui, penyusunan Tugas Akhir ini dilakukan sebagai pemenuhan persyaratan dalam menyelesaikan Studi Kesarjanaan (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS). Dalam Tugas Akhir ini, pengaruh *Vortex Induced Vibration* (VIV) terhadap tegangan dan umur kelelahan dari suatu pipa yang telah beroperasi khususnya pada pipa yang berada lokasi *crossing pipelines* merupakan pembahasan utama dalam laporan ini.

Besar kesadaran penulis mengenai banyaknya kekurangan dalam laporan ini sehingga kritik dan saran sangat dibutuhkan dalam menyempurnakan laporan selanjutnya. Semoga, laporan ini dapat bermanfaat bagi perkembangan teknologi kemaritiman dan industri migas (minyak dan gas) di Indonesia terkhusus pada bidang *pipelines* untuk pembaca umumnya dan penulis khususnya.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Januari 2015

Idham Aulia M. Basir

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini penulis tidak terlepas dari bantuan serta dorongan moral maupun material dari banyak pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu. Pada kesempatan ini saya ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Allah SWT., Tuhan Yang Maha Esa dan Kuasa yang telah memberikan kehendak dan kuasa-Nya dalam bentuk terselesaikannya tugas akhir ini dengan baik dan tanpa suatu halangan apapun yang berarti, sehingga memberikan kesempatan kepada penulis untuk berbagi kebermanfaatan melalui tugas akhir ini.
2. Orang tua terbaik dan luar biasa yang pernah ada, Ayahku, Ir. Basir Nappu, M.Sc., dan Ibuku, Ir. Hj. Sulastris Sindjilala, terima kasih atas segala doa, kasih sayang, perhatian, dukungan, kepercayaan, kesabaran, dan cinta yang telah kalian berikan selama ini. Maafkan anakmu ini yang tidak bisa memenuhi ekspektasi kalian untuk menjadi yang terbaik, percayalah, saya telah berusaha semaksimal dan seterbanyak mungkin untuk melakukan itu. Kalian berdua adalah motivasi terbesarku, bahkan sejak pertama kali saya menuntut ilmu di negeri orang, untuk bisa menjadi orang yang dapat engkau berdua banggakan.
3. Keempat saudara terbaik yang pernah dititipkan oleh Allah SWT, Idhea Putra M. Basir, Imam Insani M. Basir, Ibnu Hidayat M. Basir, dan Ikhwanul Ramadhan M. Basir, untuk apa yang telah kalian berikan selama ini. Kalian adalah motivasi terbesar bersama Ibu dan Ayah selama ini Maafkan saya jika tidak bisa menjadi adik dan kakak yang baik buat kalian, tapi bagi saya, kalian tak tergantikan.
4. Nenek Aji, Dr. Sinjilala, dan Nenek Mama, Ruth Tandi, atas segala materi, motivasi, dan doa sehingga dapat membantu menyelesaikan sarjana ini. Semoga Nenek Aji dan Nenek Mama tetap sehat selalu dan kita sekeluarga bisa berkumpul bersama-sama lagi.
5. Tante Tati dan Om Hamid, orang tua keduaku, atas segala kebaikan dan bantuan buat anakmu ini selama berada di Surabaya. Serta adik-adikku, Adif, Oges, dan Afif, yang telah menerimaku dalam kehidupan kalian. Maafkan

anakmu ini yang banyak merepotkan kalian selama ini. Seandainya bisa saya balas segala kebaikan yang telah kalian semua berikan kepadaku.

6. Kedua Dosen Pembimbing Tugas Akhir saya, yaitu Bapak Ir. Imam Rochani, M.Sc., dan Bapak Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D., saya berterima kasih sebesar-besarnya atas pengetahuan dan bimbingannya selama ini.
7. Mas Anca (2009), Mas Adi (2009), dan Mas Arif (2009), yang telah membantu dalam pengerjaan tugas akhir ini, terkhusus dalam pemahaman teori dan permodelan. Juga terima kasih untuk teman-teman Megalodon seperjuanganku, terkhusus Ibnu, Rizal, Alkhaf, Ade Lido, dan Detta, yang telah menjadi teman *sharing* dalam pengerjaan tugas akhir ini. Serta teman-teman angkatan 2010 yang lain tidak bisa saya sebutkan satu-persatu, terima kasih.
8. Annisa Mungkar, yang selalu memberikan dukungan semangat, doa, dan keyakinannya, sehingga saya bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini.
9. Bapak Sujantoko, selaku dosen wali saya yang telah membantu dan mengarahkan selama saya berkuliah di Jurusan Teknik Kelautan.
10. Bapak dan ibu dosen beserta seluruh civitas akademika Jurusan Teknik Kelautan atas semua bimbingan dan ilmu yang diberikannya.

Sekali lagi, terima kasih banyak untuk semua pihak yang telah tertuliskan. Semoga, kebaikan ini akan mendapatkan balasan pahala dari Allah SWT..

Surabaya, Januari 2015

Idham Aulia M. Basir

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR NOTASI	xvi
DAFTAR LAMPIRAN	xxii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah	6
BAB II TINJUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	9
2.1 Tinjauan Pustaka	9
2.2 Dasar Teori	10
2.2.1 Umum	10
2.2.2 Kondisi Pembebanan	12
2.2.3 Jenis Pembebanan	13
2.2.4 Beban Lingkungan	13

2.2.5	Kriteria Aliran	23
2.2.6	Analisis <i>Free Span</i> Statik Pipa Bawah Laut	24
2.2.7	Analisis <i>Free Span</i> Dinamik Pipa Bawah Laut	30
2.2.8	Respon Model	48
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		57
3.1	Metodologi Penelitian	57
3.1.1	Metodologi Penelitian untuk Analisa Statis <i>Free Span</i> dan Tegangan <i>Pipelines</i>	57
3.1.2	Metodologi Penelitian untuk Analisa <i>Free Span</i> Dinamis	58
3.1.3	Metodologi Penelitian untuk Analisa Kelelahan pada <i>Free Span</i>	59
3.2	Prosedur Penelitian	59
3.2.1	Prosedur Penelitian untuk Analisa Statis <i>Free Span</i> dan Tegangan <i>Pipelines</i>	59
3.2.2	Prosedur Penelitian untuk Analisa <i>Free Span</i> Dinamis	60
3.2.3	Prosedur Penelitian untuk Analisa Kelelahan pada <i>Free Span</i>	62
BAB IV ANALISIS DAN HASIL PENELITIAN		65
4.1	Umum	65
4.2	Pengumpulan Data	67
4.2.1	<i>Crossing Detail</i>	67
4.2.2	<i>Pipeline Design Parameter</i>	67
4.2.3	<i>Pressure and Temperature</i>	67
4.2.4	<i>Pipelines and Riser Mechanical Properties</i>	68
4.2.5	<i>Subsea Pipeline External Coating System</i>	68
4.2.6	<i>Concrete Coating</i>	69
4.2.7	<i>Corrosion Allowance</i>	69
4.2.8	Data Lingkungan	69
4.3	Hasil Perhitungan Analisis Tegangan	72
4.4	Hasil Perhitungan Analisis Statik <i>Free Span</i>	74

4.5	Hasil Perhitungan Analisis Dinamis <i>Free Span</i>	75
4.5.1	Pemilihan Teori Gelombang	75
4.5.2	Perhitungan Kecepatan Arus	76
4.5.3	Penentuan Klasifikasi Respon <i>Free Span</i> dan Kriteria Respon Pipa terhadap Rasio Aliran Arus dan Kecepatan	77
4.5.4	Perhitungan Analisis Dinamis <i>Free Span</i>	79
4.6	Hasil Perhitungan Analisis Kelelahan <i>Free Span</i>	89
4.7	Permodelan Aliran Menggunakan ANSYS CFX	95
4.7.1	Umum	95
4.7.2	Langkah Pengerjaan	96
4.7.3	Hasil Permodelan	99
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	101
5.1	Kesimpulan	101
5.2	Saran	102
DAFTAR PUSTAKA		103
LAMPIRAN		
BIODATA PENULIS		

DATA TABEL

Tabel 2.1	Rekomendasi Koefisien Hidrodinamika untuk Aliran <i>Steady</i>	21
Tabel 2.2	Parameter Kekasaran <i>Seabed</i>	24
Tabel 2.3	Kriteria Respon Pipa Terhadap Rasio Aliran	25
Tabel 2.4	<i>Screening Allowable Stress</i> untuk Kondisi Operasi	28
Tabel 2.5	Klasifikasi Respon <i>Free Span</i>	33
Tabel 2.6	Faktor Keamanan <i>Screening Criteria</i>	39
Tabel 2.7	Faktor Keamanan <i>Screening Fatigue</i>	39
Tabel 2.8	Klasifikasi Pengelasan dalam <i>Pipelines</i>	42
Tabel 2.9	Konstanta Kondisi Batas	44
Tabel 2.10	Koefisien Kekakuan Dinamik Tanah	48
Tabel 4.1	<i>Pipelines Reference</i>	67
Tabel 4.2	<i>Key Coordinates</i>	67
Tabel 4.3	<i>Platform Water Depth</i>	67
Tabel 4.4	<i>Pipeline Crossing Details</i>	67
Tabel 4.5	<i>Pipeline/Riser Process Data</i>	68
Tabel 4.6	<i>Pipeline/Riser Mechanical Properties</i>	68
Tabel 4.7	<i>Subsea Pipeline Coating Properties</i>	69
Tabel 4.8	<i>Concrete Coating Properties</i>	69
Tabel 4.9	<i>Internal Corrosion Allowance</i>	69
Tabel 4.10	<i>Pipeline Water Depth</i>	69
Tabel 4.11	<i>Tidal Data</i>	70
Tabel 4.12	<i>Sea Water Properties</i>	70
Tabel 4.13	<i>Wave Parameters</i>	70
Tabel 4.14	<i>Current Data</i>	71
Tabel 4.15	<i>Hydrodynamic Coefficient</i>	71
Tabel 4.16	<i>Soil Parameters</i>	71
Tabel 4.17	Data <i>Input</i> Untuk Perhitungan Analisis Tegangan	72

Tabel 4.18	Perhitungan Analisis Tegangan	73
Tabel 4.19	Validasi Hasil Perhitungan Tegangan	73
Tabel 4.20	Hasil Perhitungan Analisis Statik <i>Free Span</i>	74
Tabel 4.21	Klasifikasi Respon <i>Free Span</i>	78
Tabel 4.22	Klasifikasi Kriteria Respon Pipa terhadap Rasio Aliran Arus	79
Tabel 4.23	Data <i>Input</i> untuk Analisis Dinamis <i>Free Span</i>	80
Tabel 4.24	Data <i>Safety Factor</i> untuk Analisis Dinamis <i>Free Span</i>	81
Tabel 4.25	Data Lingkungan untuk Analisis Dinamis <i>Free Span</i>	81
Tabel 4.26	Perhitungan Luas Penampang	82
Tabel 4.27	Perhitungan Massa	83
Tabel 4.28	Perhitungan Berat	83
Tabel 4.29	Perhitungan <i>Concrete Stiffness Enhancement Factor</i>	84
Tabel 4.30	Perhitungan <i>Hydrodynamic Parameter</i>	84
Tabel 4.31	Perhitungan Faktor Koreksi	85
Tabel 4.32	Perhitungan <i>Allowable Free Span</i> untuk Kondisi <i>In-Line Motion</i>	86
Tabel 4.33	Perhitungan <i>Allowable Free Span</i> untuk Kondisi <i>Cross-Flow Motion</i>	87
Tabel 4.34	Rangkuman Hasil Perhitungan Analisis Dinamis <i>Free Span</i>	87
Tabel 4.35	Perbandingan Hasil Perhitungan Dinamis antara <i>Free Span</i> di Daerah <i>Crossing</i> dengan <i>Free Span</i> di Daerah <i>Non-Crossing</i> untuk Arah <i>Cross-Flow</i>	89
Tabel 4.36	Klasifikasi Pengelasan dalam <i>Pipelines</i> (DNV-RP-C203)	90
Tabel 4.37	Data <i>Input</i> untuk Perhitungan Analisis <i>Fatigue</i>	91
Tabel 4.38	Hasil Perhitungan Analisis <i>Fatigue Free Span</i>	94

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Peta Hidrokarbon di Indonesia	2
Gambar 1.2	Tampak Atas Letak <i>Crossing</i> antara <i>Purposed 6" KA-KC Gas Lift Pipeline</i> dan <i>Existing Pipeline 14 KC-KA</i>	3
Gambar 1.3	Tampak Samping Letak <i>Crossing</i> antara <i>Purposed 6" KA-KC Gas Lift Pipeline</i> dan <i>Existing Pipeline 14 KC-KA</i>	4
Gambar 2.1	Jaringam Pipa Bawah Laut	9
Gambar 2.2	Tipe Umum <i>Free Span</i> Pipa Bawah Laut	11
Gambar 2.3	Grafik <i>Region of Validity of Wave Theories</i>	14
Gambar 2.4	Ilustrasi Konsentrasi <i>Streamline</i> yang Melewati Pipa	17
Gambar 2.5	Penentuan Koefisien Hidrodinamika	19
Gambar 2.6	Koefisien Hidrodinamika untuk Arus dan Gelombang yang Bekerja Bersamaan pada <i>On-Bottom Pipe</i>	20
Gambar 2.7	Definisi Satuan pada Analisis Data Arus	23
Gambar 2.8	Ilustrasi Tekanan Internal dan Tekanan Eksternal pada Pipa Bawah Laut	27
Gambar 2.9	Sketsa Kategori Respon <i>Free Span</i> Dinamik	32
Gambar 2.10	Klasifikasi Morfologi Interaksi <i>Free Span</i>	33
Gambar 2.11	Ilustrasi Span Gap	36
Gambar 2.12	Kurva S-N untuk Tipe 2 Kemiringan (<i>Two-Slope</i>)	41
Gambar 2.13	Kurva S-N untuk Kondisi di Laut dengan Proteksi Katodik (<i>Cathodic Protection</i>)	42
Gambar 2.14	Respon Amplitudo <i>In-Line VIV</i> vs V_R vs K_{sd}	50
Gambar 2.15	Ilustrasi Pembentukan Grafik Respon Model <i>In-Line VIV</i>	52
Gambar 2.16	Respon Amplitudo <i>Cross-Flow VIV</i> vs V_{Rd} vs K_{Sd}	54
Gambar 2.17	Definisi Parameter untuk Penentuan Faktor Koreksi <i>Trench</i>	56
Gambar 2.18	Ilustrasi Pembentukan Grafik Respon Model <i>Cross-flow VIV</i>	56
Gambar 3.1	Diagram Alir untuk Analisa Statis <i>Free Span</i> dan Tegangan	57

Pipelines

Gambar 3.2	Diagram Alir untuk Analisa <i>Free Span</i> Dinamis	58
Gambar 3.3	Diagram Alir untuk Analisa Kelelahan pada <i>Free Span</i>	59
Gambar 4.1	<i>Kilo Field Layout</i>	65
Gambar 4.2	<i>Kilo Field Layout Development</i>	66
Gambar 4.3	Lokasi <i>Crossing Pipelines</i> antara <i>Existing Pipelines</i> KC-KA dengan <i>Proposed Pipelines</i> KA-KC	66
Gambar 4.4	<i>Region of Validity of Wave Theories</i>	75
Gambar 4.5	Langkah Pengerjaan Interpolasi	76
Gambar 4.6	Langkah Pengerjaan Kecepatan Arus pada <i>Inner Zone</i>	77
Gambar 4.7	Geometri <i>Free Span</i> yang Ditinjau	79
Gambar 4.8	Kurva S-N untuk Kondisi di Laut dengan Proteksi Katodik (<i>Cathodic Protection</i>)	91
Gambar 4.9	Grafik Hubungan Bilangan <i>Reynolds</i> dengan Bilangan <i>Strouthal</i> (DNV-Submarine Pipelines System, 1981)	92
Gambar 4.10	Langkah Pengerjaan Nilai Fungsi Reduksi ($R_{I\phi,1}$ dan $R_{I\phi,2}$)	93
Gambar 4.11	Grafik Hubungan Intensitas Turbulensi (I_c) dengan Sudut Aliran	93
Gambar 4.12	Permodelan Geometri dari <i>Free Span</i> yang Berada di Lokasi <i>Crossing</i>	96
Gambar 4.13	Aliran <i>Inlet</i> (Kiri) dan <i>Outlet</i> (Kanan) untuk Aliran Arus pada Model Geotemtri	97
Gambar 4.14	Visualisasi <i>Meshing</i> Geometri <i>Free Span</i> yang Ditinjau	98
Gambar 4.15	Pemberian <i>Boundary Condition</i> pada Tiap Part <i>Model</i>	98
Gambar 4.16	Hasil <i>Running</i> untuk Interaksi antara Aliran Arus dan <i>Free Span</i> dengan Kecepatan Sebesar 0.304625 m/s	99

DAFTAR NOTASI

Simbol	Penjelasan	Satuan
$A(a)$: amplitudo gelombang	(m)
c	: kecepatan gelombang	(m/s)
$h(d)$: kedalaman perairan dari permukaan hingga <i>seabed</i>	(m)
H	: tinggi gelombang dari lembah ke puncak	(m)
L	: panjang gelombang	(m)
x	: perpindahan arah horizontal dari puncak gelombang	(m)
$\eta(x,t)$: elevasi muka air pada titik x saat t	
F_D	: gaya seret per satuan panjang	(N/m)
U	: kecepatan beban lingkungan total	(m/s)
C_D	: koefisien <i>drag</i>	
ρ	: massa jenis air	(kg/m ³)
D	: diameter terluar pipa	(m)
F_I	: gaya inersia per satuan panjang	(N/m)
C_I	: koefisien inersia = $C_M + 1$	
C_M	: koefisien <i>added mass</i> = 1	
$\frac{dU}{dt}$: percepatan <i>horizontal</i> arus	(m/s ²)
F_L	: gaya angkat per satuan panjang	(N/m)
C_L	: koefisien gaya angkat (<i>lift force coefficient</i>)	(m/s)
ν	: viskositas kinematik pada air yang bersuhu 60°F	(m ² /s)
T	: periode gelombang	(s)
k	: tingkat kekasaran	
$U(z)$: kecepatan arus di atas <i>seabed</i>	(m/s)
z_o	: parameter kekasaran <i>seabed</i>	(m)
z_r	: ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga tempat peletakan pipa	(m)

z	: ketinggian di atas <i>seabed</i> hingga letak pipa	(m)
$U(z_r)$: kecepatan arus berdasarkan perhitungan ketinggian dari <i>outer zone</i>	(m/s)
R_c	: <i>reduction factor</i>	
θ_{curr}	: sudut datang arus terhadap <i>freespan</i>	(°)
U_c	: kecepatan arus	(m/s)
U_w	: kecepatan gelombang	(m/s)
L_{st}	: panjang <i>free span</i> statik yang diijinkan	(m)
C	: konstanta ujung peletakan	
I	: <i>momen inertia</i> penampang pipa	(m ⁴)
σ_e	: tegangan ekuivalen (<i>von mises stress</i>)	(N/m ²)
C_M	: koefisien <i>added mass</i> = 1	
W_t	: berat pipa terdistribusi merata per satuan panjang	(N/m)
W_{sub}	: berat pipa terendam dalam air per satuan panjang (<i>submerged weight</i>)	(N/m)
σ_h	: <i>hoop stress</i>	(N/m ²)
P_i	: <i>internal pressure</i>	(N/m ²)
t	: ketebalan pipa	(m)
F	: faktor desain (untuk <i>riser</i> dan <i>pipelines</i> = 0.8)	
E	: <i>longitudinal joint factor</i> (untuk material API 5L = 1.0)	
T	: <i>temperatur derating factor</i> (untuk suhu kurang dari 250°F =1.0)	(m)
E	: <i>modulus young</i> = $2,07 \times 10^{11}$	(N/m ²)
α	: koefisien ekspansi termal = $11,7 \times 10^{-6}$	(°C-1)
T_2	: temperatur operasi	(°C)
T_1	: kecepatan beban lingkungan total	(°C)
σ_p	: <i>poissons stress</i>	(N/m ²)
ν	: <i>poisson's ratio</i> = 0,3	
σ_L	: tegangan longitudinal	(N/m ²)

σ_T	: <i>thermal stress</i>	(N/m ²)
τ	: tegangan geser tangensial	(N/m ²)
σ_E	: tegangan ekuivalen	(N/m ²)
K_s	: <i>stability parameter</i>	
m_e	: massa efektif pipa per satuan panjang	(kg/m)
ζ_T	: rasio peredaman total	
m_p	: massa pipa termasuk <i>coating</i> per satuan panjang	(kg/m)
m_f	: massa fluida dalam pipa per satuan panjang	(kg/m)
m_a	: massa yang di tambahkan per satuan panjang	(kg/m)
$M_{struktur}$: massa total struktur pipa	(kg/m)
$M_{concrete}$: parameter kekasaran <i>seabed</i>	(kg/m)
ρ_{coat}	: <i>corrosion coating density</i>	(kg/m ³)
ID	: diameter dalam pipa	(m)
ρ	: massa jenis fluida	(kg/m ³)
C_a	: koefisien massa yang ditambahkan	(m/s)
e	: gap <i>freespan</i>	(m)
$f_{0,IL}$: frekuensi natural <i>free span</i> untuk arah <i>in-line</i>	(Hz)
L	: panjang <i>free span</i>	(m)
γ_f	: faktor keamanan (SF) untuk frekuensi natural	
γ_{IL}	: faktor <i>screening</i> untuk arah <i>in-line</i>	
$U_{c,100\ year}$: kecepatan arus rata-rata untuk periode kembali 100 tahun	(m/s)
$\bar{\alpha}$: rasio aliran arus	
$U_{w,1\ year}$: kecepatan aliran yang diakibatkan gelombang naik untuk periode kembali 1 tahun	(m/s)
$V_{R,onset}^{IL}$: nilai permulaan (<i>onset</i>) <i>in-line</i> untuk <i>reduced velocity</i>	
$\gamma_{on,IL}$: <i>safety factor</i> pada permulaan (<i>onset</i>) untuk <i>in-line</i>	
K_{sd}	: <i>stability parameter factor</i> untuk perancangan	
γ_k	: <i>safety factor</i> pada <i>stability parameter</i>	
$f_{0,CF}$: frekuensi alami <i>cross-flow</i>	(Hz)

γ_{CF}	: <i>screening factor</i> untuk <i>cross-flow</i>	
$V_{R,onset}^{CF}$: nilai permulaan (<i>onset</i>) <i>cross-flow</i> untuk <i>reduced velocity</i>	
$\psi_{proxy,onset}$: faktor koreksi untuk dekatnya dasar laut (<i>seabed proximity</i>)	
$\psi_{mass,onset}$: faktor koreksi untuk massa	
$\psi_{\alpha,onset}$: faktor koreksi untuk kecepatan arus	
M_{ratio}	: diameter dalam pipa	
D_{fat}	: akumulasi dari dampak kelelahan	
n_i	: total jumlah siklus tegangan yang berhubungan dengan (<i>mid-wall</i>) dari rentang tegangan S_i	
N_i	: jumlah siklus kegagalan pada rentang tegangan S_i	
\sum	: menandakan jumlah keseluruhan fluktuasi tegangan yang terjadi pada umur desain	
m_1, m_2	: <i>fatigue exponent (the inverse slope of the bi-linear S-N curve)</i>	
\bar{a}_1, \bar{a}_2	: konstanta dari karakteristik kekuatan kelelahan	
γ_{IL}	: faktor <i>screening</i> untuk arah <i>in-line</i>	
S_{sw}	: tegangan pada perpotongan dari 2 kemiringan dalam kurva S-N yang bertipe 2 kemiringan (<i>two-slope SN curve</i>)	
P_i	: kemungkinan kejadian untuk kondisi “ i ” dari <i>stress range</i>	
$C_1, C_2, C_3, C_4, \text{ dan } C_6$: koefisien kondisi batas	
CSF	: <i>concrete stiffness enhancement factor</i>	
S_{eff}	: gaya aksial efektif per satuan panjang	(N/m)
P_E	: beban <i>Euler</i>	(N/m)
δ	: defleksi statis	(m)
H_{eff}	: tegangan <i>tension</i> dari <i>pipelay barge</i> pada fase instalasi	(N/m)

	(<i>pipe laying</i>)	
Δ_{pi}	: perbedaan tegangan internal relatif terhadap fase instalasi ($P_i = 0$)	(N/m)
A_{pipa}	: luas penampang melintang pipa	(m ²)
A_i	: uas penampang bagian dalam pipa (<i>internal cross section</i>)	(m ²)
ΔT	: perbedaan temperatur relatif terhadap fase instalasi	(°C)
α_s	: koefisien ekspansi temperatur, diabaikan karena temperatur dianggap konstan	
k_c	: konstanta empiris yang meliputi deformasi/slip pada lapisan anti korosi dan keretakan pada lapisan <i>concrete</i> (=0,33 untuk aspal dan 0,25 untuk PP/PE <i>coating</i>)	
I_{conc}	: momen inersia lapisan beton	(m ⁴)
I_{steel}	: momen inersia pipa baja	(m ⁴)
E_{conc}	: modulus elastisitas lapisan beton	(N/m ²)
E_{steel}	: modulus elastisitas pipa baja	(N/m ²)
L_{eff}	: panjang span efektif	(m)
q	: beban berupa berat terendam pipa atau gaya hidrodinamis	(N/m)
K_L	: kekakuan dinamik arah lateral	(N/m ²)
K_V	: kekakuan dinamik arah vertikal	(N/m ²)
C_L	: faktor kekakuan dinamik arah lateral	
C_V	: faktor kekakuan dinamik arah vertikal	
L	: panjang span aktual	(m)
K	: kekakuan tanah relevan, baik secara vertikal (K_v) maupun horizontal (K_H)	(N/m ²)
V_R	: <i>reduced velocity</i>	
K_C	: bilangan <i>Keulegan-Carpenter</i>	
f_w	: frekuensi gelombang	(rad/s)
θ_{rel}	: sudut aliran relatif terhadap pipa	(°)
I_c	: intensitas turbulensi	
S_{IL}	: <i>stress range</i> pada arah <i>in-line</i> VIV	(N/m ²)

A_{IL}	: <i>unit amplitude stress</i> , tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi <i>in-line</i>	(N/m ²)
$\psi\alpha_{,IL}$: faktor koreksi untuk rasio kecepatan aliran arus	(N/m ²)
A_{γ}/D	: amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah <i>in-line</i> VIV	
S_{CF}	: <i>stress range</i> pada arah <i>cross-flow</i> VIV	(N/m ²)
A_{CF}	: <i>unit amplitude stress</i> , tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi <i>cross-flow</i>	(N/m ²)
R_k	: faktor reduksi amplitude akibat adanya <i>damping</i> /redaman	(N/m ²)
A_z/D	: amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah <i>cross-flow</i> VIV	

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pesatnya pertumbuhan industri minyak dan gas lepas pantai menjadikan jaringan pipa sebagai alternatif sarana transportasi fluida. *Pipeline* digunakan dalam berbagai macam tujuan salah satu diantaranya adalah sebagai *trunk line* yakni mengangkut minyak dan/atau gas dari fasilitas produksi menuju daratan (Mousselli, 1981). Selain itu, kebutuhan industri migas akan mendorong semakin banyak penggunaan jaringan pipa sarana transportasi fluida karena dirasa lebih ekonomis dan efisien. Perlu diketahui bahwa dalam melakukan distribusi hasil pengeboran gas dan minyak dapat menggunakan kapal dan sistem perpipaan.

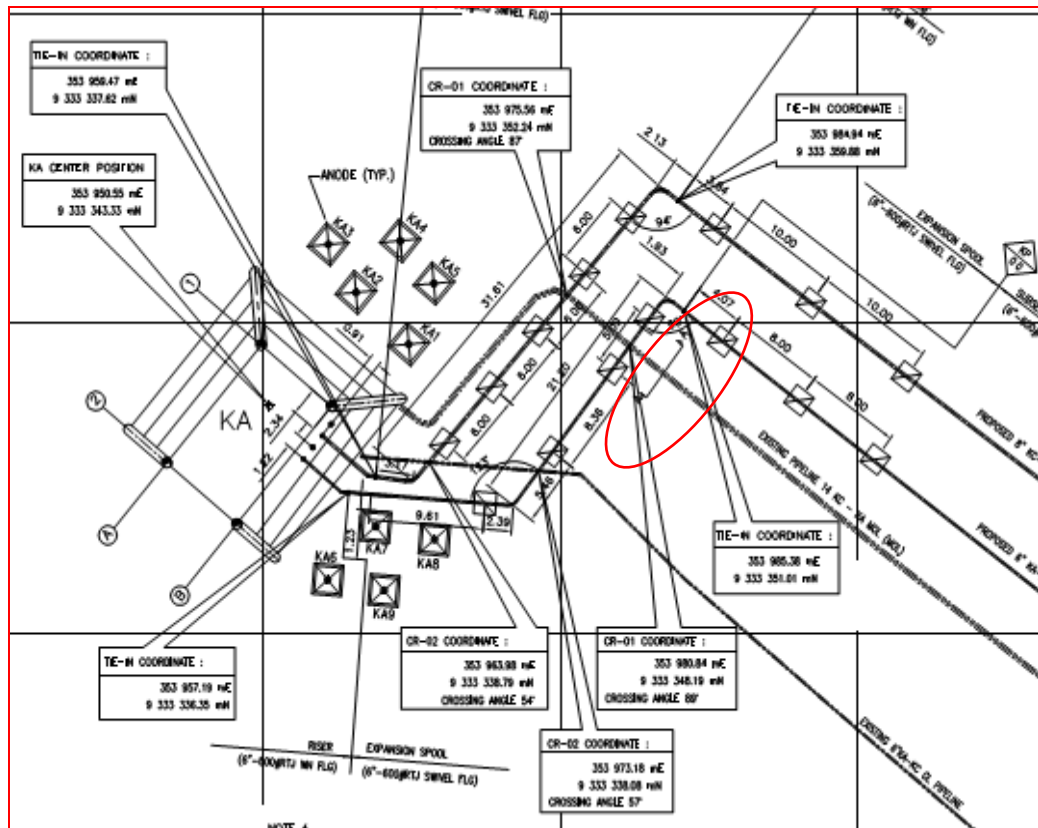
Proses distribusi baik menggunakan kapal atau pun menggunakan sistem perpipaan memiliki keuntungan dan kerugian masing-masing. Untuk distribusi menggunakan kapal memiliki keuntungan yaitu mampu digunakan untuk distribusi dalam jarak yang relatif jauh, sedangkan kerugiannya adalah distribusi menggunakan kapal membutuhkan biaya yang relatif besar serta minyak dan gas hasil pengeboran perlu terlebih dahulu diolah sebelum didistribusikan. Untuk distribusi menggunakan sistem perpipaan memiliki keuntungan diantaranya minyak dan gas bumi hasil dari pengeboran tidak perlu terlebih dahulu memerlukan pengolahan, selain itu membutuhkan biaya yang relatif kecil daripada distribusi menggunakan kapal, sedangkan kerugian dari sistem perpipaan adalah hanya mampu mendistribusikan dalam jarak yang relatif terbatas, selain itu membutuhkan pemeliharaan yang relatif sering.



Gambar 1.1 Peta Hidrokarbon di Indonesia (Direktorat Jendral Minyak dan Gas Bumi, 2010)

Namun, karena medan yang dilalui oleh saluran pipa sangat beragam, yaitu mulai dari dalam laut, dataran rendah, lembah, dan di dalam tanah, maka dalam pengoperasiannya akan banyak ditemukan berbagai macam persoalan, baik persoalan kelelahan (*fatigue*), korosi (*corrosion*), maupun retak (*crack*). Dari ketiga jenis permasalahan yang biasa dialami pipa, maka keretakan menjadi persoalan yang sangat diperhatikan karena efek lanjutannya bisa mengakibatkan kebocoran dan ledakan (Tawekkal, 2010).

Seiring dengan berkembangnya sektor ini, telah banyak proyek eksploitasi yang telah dilakukan di Indonesia. Sebagian besar dari proyek-proyek tersebut menggunakan pipa bawah laut sebagai media penyaluran hasil eksploitasi. Pada proses perencanaan pipa bawah laut, sering ditemukan masalah dimana suatu rute pipa bawah laut yang akan dikonstruksi bertemu dengan rute pipa bawah laut yang telah dikonstruksi dari proyek berbeda sebelumnya (*pipeline existing*). Kondisi semacam ini disebut *crossing* (Musya, 2013)

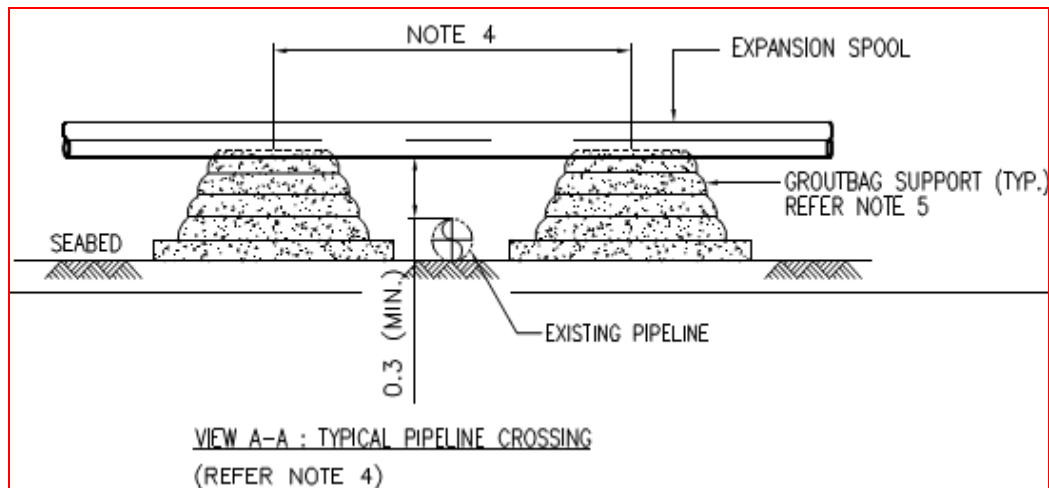


Gambar 1.2 Tampak Atas Letak *Crossing* antara *Purposed 6" KA-KC Gas Lift Pipeline* dan *Existing Pipeline 14 KC-KA* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Crossing (persilangan) pada *pipeline* merupakan kondisi dimana terdapat lebih dari satu jalur pipa yang saling bersilangan dan berdekatan secara vertikal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.2 dan 1.3. Kondisi persilangan tersebut secara otomatis akan menghasilkan bentangan pipa (*free span*). Ketika terjadi *free span*, pipa secara statis akan mengalami defleksi akibat beban pada pipa itu sendiri, yang apabila tegangan pada pipa itu melebihi batas tegangan lelehnya maka akan menyebabkan keruntuhan leleh. Selain itu, tegangan leleh dari pipa tersebut dapat melebihi jika panjang *free span* jauh melebihi kriteria tegangan lelehnya pada kondisi statis yang membuat beban bagi bentangan yang terjadi lebih berat (Pratama, 2007).

Untuk dampak dari segi dinamis, *free span* yang terjadi akan mengalami vibrasi akibat gaya hidrodinamika yang bekerja pada daerah tersebut atau

biasa disebut fenomena *Vortex Induced Vibration* (VIV). Fenomena VIV terjadi akibat terbentuknya *vortex* di belakang pipa yang membelakangi arah aliran arus yang membentur pipa sehingga berdampak pada tekanan di area belakang pipa menjadi lebih kecil dibandingkan di area depan pipa sehingga menyebabkan terjadinya vibrasi. Vibrasi yang terbentuk ini akan menyebabkan terjadinya kelelahan (*fatigue*) pada pipa (Prayoga, 2013).



Gambar 1.3 Tampak Samping Letak *Crossing* antara *Purposed 6" KA-KC Gas Lift Pipeline* dan *Existing Pipeline 14 KC-KA* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Berdasarkan penjelasan di atas, dapat kita melihat bahwa *free span* merupakan salah satu ancaman yang sangat dihindari dalam membuat suatu sistem jaringan perpipaan (*pipelines*) terkhusus pada jaringan pipa bawah laut. Sehingga perlu adanya analisis mengenai kondisi *free span* yang terjadi beserta gaya-gaya yang mungkin mengenai *free span* dapat diketahui metode yang sesuai dalam analisis tersebut. Dalam Tugas Akhir ini, analisis yang dilakukan berhubungan dengan perhitungan tegangan pipa secara keseluruhan sehingga menghasilkan panjang inisial dari *span* secara statik, kemudian dilanjutkan dengan analisis dari segi beban dinamis (*dynamic analysis*) pada lokasi persilangan (*crossing*) yang akan menghasilkan panjang *span* dari segi beban dinamis, dan analisis kelelahan (*fatigue analysis*) yang akan menghasilkan umur kelelahan dari *free span* yang terbentuk.

Adapun perhitungan dari keseluruhan analisis mengacu pada beberapa code yang telah ada. Untuk analisis tegangan, penulis menggunakan acuan dari ASME (*American Society of Mechanical Engineering*) B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*. Sedangkan untuk analisis beban dinamis dan kelelahan menggunakan acuan dari DNV-RP-F105 tahun 2002 mengenai *Free Spanning Pipelines*.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Berapa tegangan ekivalen (*von Mises*) pipa yang berada di lokasi *crossing*?
2. Berapa panjang *allowable span* pada daerah *crossing* untuk kondisi dinamis?
3. Berapa umur kelelahan *free span* yang terdapat pada lokasi *crossing*?

1.3 Tujuan

Dari permasalahan diatas, tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Menentukan tegangan ekivalen (*von Mises*) pipa yang berada di lokasi *crossing*.
2. Menentukan panjang *allowable span* pada daerah *crossing* untuk kondisi dinamis.
3. Menentukan umur kelelahan *free span* yang terdapat pada lokasi *crossing*.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diambil dari Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Dari segi analisis tegangan, penulis diharapkan mampu menunjukkan langkah-langkah perhitungan tegangan yang benar (sesuai dengan *code* ASME B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*) serta memperlihatkan apakah tegangan yang terjadi pada daerah *crossing* sebagai daerah tinjauan masih berada pada batas aman yang telah ditentukan.

2. Sedangkan dari segi analisis dinamis dan kelelahan dari *free span*, penulis dapat membuktikan analisis *free span* yang dilakukan untuk arah *in-line* maupun arah *cross-flow* mendapatkan pengaruh VIV (*vortex induced vibration*) sehingga terjadi vibrasi dan menyebabkan kelelahan atau tidak berdasarkan *screening* yang telah ditetapkan (sesuai dengan *code* DNV-RP-F105 mengenai *Free Spanning Pipelines*), dan menunjukkan langkah yang sesuai dalam mencari umur kelelahan apabila salah satu arah yang dianalisis mengalami kegagalan.
3. Selain itu, penulis juga diharapkan mampu memperlihatkan seberapa besar panjang *allowable span* yang terbentuk pada lokasi *crossing*, baik yang didapatkan berdasarkan analisis untuk kondisi statik maupun dinamis, serta melihat apakah *allowable span* yang didapatkan masih memenuhi batas ketentuan yang telah ditetapkan sebelumnya atau tidak.

1.5 Batasan Masalah

Pembatasan masalah ini digunakan untuk menghindari pembahasan yang melebar dan mempermudah perhitungan sehingga digunakan asumsi-asumsi sebagai berikut:

1. Analisis tegangan pipa, statis dan dinamis *free span* dilakukan hanya pada kondisi operasi saja;
2. Analisis stabilitas dari pipa dan *free span* diabaikan;
3. Pengaruh *scouring* diabaikan;
4. *Grout Bag* pada lokasi *crossing* diabaikan sehingga panjang *free span* menjadi 15.67 m;
5. Perhitungan *dynamic analysis* dan *fatigue analysis* hanya dilakukan pada lokasi *crossing*;
6. Tanah diasumsikan berjenis *very soft clay* dan homogen di sepanjang pipa;
7. Analisis dinamis dan kelelahan *free span* menggunakan *code* DNV-RP-F105 tahun 2002 mengenai *Free Spanning Pipelines*;
8. Analisis tegangan pipa menggunakan *code* ASME B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*;

9. Pengaruh gelombang sangat kecil sehingga ditiadakan berada di bagain *deep water*;
10. Untuk perhitungan *fatigue life*, menggunakan rumusan Palmgren-Miner dengan pendekatan Weibull Diagram.

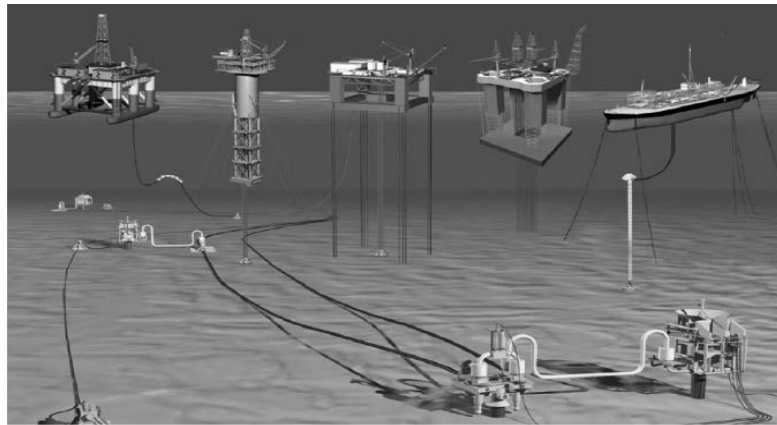
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Minyak dan gas merupakan sumber energi paling banyak yang digunakan oleh manusia. Sumber energi ini merupakan bagian mendasar pada kebutuhan hidup umat manusia. Hal ini menyebabkan semakin intensifnya usaha pencarian dan eksplorasi migas di daerah lepas pantai dan laut dalam. Untuk mengakomodasi penyaluran minyak dan gas bumi dari sumur-sumur minyak di lepas pantai dan di laut dalam, maka digunakan jaringan pipa bawah laut sebagai alternatif yang paling mudah, aman, dan efisien.



Gambar 2.1 Jaringan Pipa Bawah Laut (Soegiono, 2007)

Pada dasarnya, telah banyak Tugas Akhir ataupun Skripsi yang telah dikerjakan mengenai *free span* pada pipa bawah laut. Banyak dari mereka yang menganalisis kelelahan akibat dari adanya VIV atau menghitung *scouring* yang terjadi pada pipa bawah laut yang mengakibatkan terjadinya *free span*. Misalnya saja pada Turdjail (2008) dalam tugas akhirnya membuktikan bahwa selain beban lingkungan seperti gelombang dan arus laut menyebabkan terjadinya vibrasi terhadap struktur, terdapat fenomena sekunder yang juga dapat menyebabkan vibrasi pada *pipelines*. Fenomena tersebut adalah pelepasan vortex (*vortex shedding*). Hal ini juga telah dibuktikan oleh Pratama (2007), Puspitasari (2008), Dianawati (2008), Putra (2013), dan Prayoga (2013).

Menurut Keye et.al (dalam Arif, 2008), metode analisis *span* dibagi dua bagian, dan masing-masing memiliki 2 tahapan, dan terdiri dari analisis tegangan awal dan cek frekuensi getaran, kemudian diikuti oleh analisis regangan serta analisis kelelahan apabila diperlukan. Dalam buku *offshore pipeline* (Guo, 2005) mengatakan bahwa resiko kerusakan pada *free span* pipa dapat terjadi dalam dua mekanisme yang terpisah, yang pertama adalah akibat *bending* yang berlebih karena beban hidrodinamis dan berat pipa itu sendiri, atau kerusakan akibat *fatigue* dalam kurun waktu panjang. Analisis *free span* akan menghasilkan panjang *free span* yang diijinkan agar tegangan yang terjadi pada *free span* tidak melebihi tegangan *yield* material pipa. Aliran dari gelombang dan arus yang timbul di sekitar pipa akan menimbulkan pusaran yang menghasilkan distribusi tekanan. Pusaran ini menghasilkan osilasi atau getaran pada pipa. Jika frekuensi dari pusaran ini mendekati frekuensi natural pipa, maka terjadi resonansi, dan inilah yang menyebabkan kelelahan pada pipa (Bai, 2001).

Namun, dari keseluruhan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, masih sedikit yang melakukan penelitian *free span* mengenai pengaruh kondisi *crossing* terhadap *vortex induced vibration* (VIV). Maka dari itu, penulis mencoba melakukan penelitian mengenai pengaruh kondisi *crossing* tersebut terhadap analisis dinamis dan kelelahan dari *free span* yang terbentuk pada suatu *pipelines*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Umum

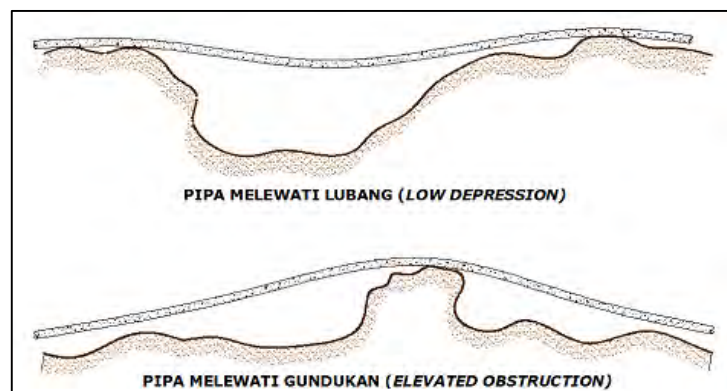
Secara definisi, *free span* pada pipa bawah laut dapat terjadi ketika kontak antara pipa dan *seabed* hilang dan memiliki jarak pada permukaan *seabed* (Guo et.al, 2005). *Free span* pada pipa dapat terjadi karena (DNV-RP-F105, 2002):

1. Permukaan *seabed* yang tidak merata.
2. Perubahan kontur dasar laut (akibat *scouring*, *sand waves*)
3. *Support* buatan.

Adanya *free span* pipa ini membutuhkan sebuah *analisis*. Hal ini karena pada *free span* pipa bekerja gaya-gaya yang dapat menyebabkan kegagalan pipa. Pada *free span* pipa harus cukup kuat melawan:

1. *Excessive yielding*
2. *Fatigue*
3. *Buckling*
4. Ovalisasi

Selain itu, dalam sebuah kasus *free span* juga dapat terjadi jika pada rute pipa tersebut memiliki persimpangan (*crossing*) dengan pipa atau kabel lain di bawah laut. Pada tahap *engineering & technical design*, pipa tidak disiapkan khusus dengan perlindungan terhadap *free span* dikarenakan biaya kapital yang menjadi lebih besar.



Gambar 2.2 Tipe Umum *Free Span* Pipa Bawah Laut (Pratama, 2007)

Dari gambar 2.2 dapat dilihat bahwa *free span* pipa pada dasar laut memiliki tipikal seperti itu. Bila terjadi suatu *free span* pada suatu rute pipa, maka perlu dicek ulang kekuatan dan keandalan kerja pipa tersebut. Perhitungan dan persiapan antisipasi ini perlu dilakukan mengingat keadaan pipa yang sudah tidak tergeletak merata pada *seabed*. Besar defleksi, dampak gaya hidrodinamika, vibrasi dan tegangan maksimum yang dapat terjadi harus dihitung untuk pengecekan kemungkinan keruntuhan pipa dengan pola statik (*Ultimate Limit State*) atau kelelahan/*fatigue* (*Fatigue Limit State*).

Analisis terhadap *free span* dapat dilakukan untuk tiap fase, yaitu :

- a. Fase instalasi (pipa kosong), gaya lingkungan 1-tahunan.

- b. Fase *hydrotest* (pipa berisi air, tekanan tertentu), gaya lingkungan 1-tahunan.
- c. Fase operasi (pipa berisi *content fluid*), gaya lingkungan 1-tahunan.

Dalam Tugas Akhir ini, analisis yang dilakukan mencakup :

- a. Analisis tegangan yang terjadi pipa, dibatasi pada perhitungan *hoop stress*, *longitudinal stress* dan *von Mises stress*.
- b. Analisis pipa tergeletak di atas *seabed*, menghitung gaya-gaya arus dan gelombang secara statik, dan interaksi terhadap tanah *seabed*.
- c. Analisis VIV yang menyebabkan osilasi pada pipa yang memicu keruntuhan pipa secara *fatigue*.
- d. Analisis *fatigue*, menentukan jumlah kerusakan akibat *fatigue* dan sisa umur pipa akibat *fatigue*.

Perlu diketahui, dalam tugas akhir ini, kondisi atau fase *analisis* yang digunakan hanya pada fase operasi. Selain itu juga kriteria yang menjadi parameter pengecekan juga akan dilakukan sesuai yang dijelaskan dalam kode acuan yaitu DNV RP F105 mengenai *Free Spanning Pipelines* untuk analisis beban dinamis dan kelelahan, dan ASME B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmissions and Distributing Piping System* untuk analisis tegangan.

2.2.2 Kondisi Pembebanan

Selama umur operasi pipa bawah laut, ada 3 jenis kondisi pembebanan, antara lain (Kenny, 1993) :

- a. Instalasi

Beban yang bekerja pada pipasaat kondisi ini antara lain : beban gelombang dan arus serta beban dari berat pipa itu sendiri. Tegangan yang terjadi pada kondisi ini dipengaruhi oleh metode instalasi yang digunakan.

- b. *Hydrotest*

Kondisi *hydrotest* dilakukan untuk menguji kekuatan pipa dengan memberikan tekanan yang besar kedalam pipa. Beban yang mempengaruhi adalah tekanan dalam pipa (*internal pressure*) dan tentunya berat pipa yang bertambah akibat adanya air laut.

c. Operasi

Setelah instalasi dan *hydrotest*, berikutnya adalah fase operasi, dimana pipa mulai digunakan untuk mengalirkan fluida yang ditentukan. Tekanan dalam yang serta temperatur yang sangat tinggi akan mempengaruhi formasi dan tegangan pada pipa.

2.2.3 Jenis Pembebanan

Menurut Kenny (1993), beban yang bekerja pada dibagi menjadi 2 kategori, antara lain :

a. *Functional Load*

Beban fungsional ini merupakan beban yang bekerja pada pipa sebagai akibat dari keberadaan pipa itu sendiri tanpa dipengaruhi oleh baban lingkungan. Beban fungsional antara lain adalah beban dari berat pipa itu sendiri, termasuk berat struktur baja pipa, lapisan anti korosi, lapisan selubung beton, beban akibat tekanan dalam yang diberikan pada pipa, beban akibat suhu yang tinggi di dalam pipa, serta beban akibat sisa instalasi.

b. *Environmental Load*

Beban ini bekerja pada pipa akibat adanya kondisi lingkungan yang terjadi. Untuk beban pada pipa bawah laut, tentunya yang mempengaruhi adalah beban gelombang dan beban arus. Untuk mendapatkan data beban lingkungan yang tentunya bersifat acak, maka data yang digunakan untuk *analisis* adalah data periode ulang (*return period*). Periode ulang merupakan data rata-rata beban yang terjadi.

2.2.4 Beban Lingkungan

Pada bagian sebelumnya telah dijelaskan secara singkat mengenai pengertian secara singkat mengenai beban lingkungan yang bekerja pada pipa secara umum. Berikut ini adalah penjabaran lebih jelas mengenai beban gelombang dan beban arus.

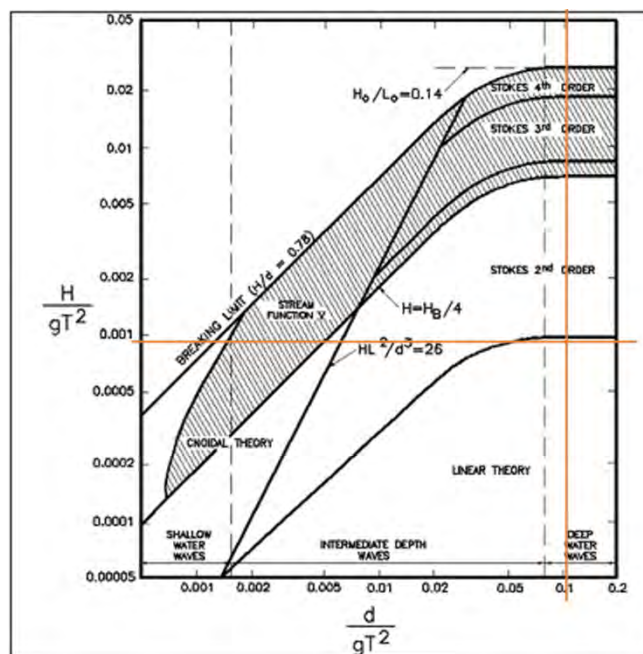
a. Gelombang

1) Penentuan Teori Gelombang

Dalam suatu analisis atau perencanaan desain pipa bawah laut, data gelombang didapatkan dengan dua cara, yaitu dari data pengukuran

langsung di laut dan data hasil *hindcasting*. Data gelombang terdiri dari data tinggi gelombang dan arah gelombang. Hasil pengolahan data pengukuran digunakan untuk kalibrasi atau validasi data gelombang hasil *hindcasting*. Data yang didapat berupa tinggi gelombang signifikan (H_s) dan perioda spektral puncak (T_p) dan tentunya arah gelombang dalam derajat. Lalu, data hasil *hindcasting* tersebut dilakukan analisis lebih lanjut untuk menentukan gelombang ekstrim perioda ulang tertentu.

Untuk menentukan teori gelombang yang digunakan dalam perancangan, dapat menggunakan grafik *Region of Validity of Wave Theories* yang parameternya didapatkan berdasarkan tinggi gelombang (H), periode gelombang (T) dan kecepatan gravitasi (g), yaitu sebagai berikut :



Gambar 2.3 Grafik *Region of Validity of Wave Theories* (Mouselli, 1981)

2) Teori gaya gelombang

Perhitungan gaya-gaya hidrodinamika yang bekerja pada suatu struktur lepas pantai ataupun pipa bawah laut belum dapat dihitung secara eksak, baik dengan penurunan secara percobaan maupun

teoritis. Oleh karena itu, digunakan metode penyederhanaan untuk mendekati perhitungan gaya hidrodinamik pada struktur laut tersebut.

Pada kasus suatu gaya hidrodinamika mengenai suatu struktur pipa bawah laut, maka diasumsikan diameter terluar dari pipa tersebut masih jauh lebih kecil dari panjang gelombang laut, sehingga gelombang tersebut melewati struktur tanpa gangguan yang berarti. Gelombang yang bergerak melewati struktur tersebut tidak terganggu, akan tetapi pengaruh terhadap struktur terjadi akibat adanya *vortex (wake formation)* yang terbentuk di belakang struktur dan *flow separation*.

Adapun gaya hidrodinamika yang terjadi pada struktur menurut Guo (2005) adalah gaya seret (*drag force*), gaya inersia (*inertia force*), dan gaya angkat (*lift force*). Berikut ini adalah penjelasan dari ketiga gaya hidrodinamika tersebut.

- Gaya seret (*Drag Force*)

Nilai gaya seret (*drag force*) yang terjadi pada suatu struktur silinder dapat dituliskan dengan persamaan berikut ini:

$$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times |U|U \quad (2.1)$$

Keterangan :

F_D : gaya seret per satuan panjang (N/m)

C_D : koefisien *drag*

ρ : massa jenis air (kg/m³)

D : diameter terluar pipa (m)

U : kecepatan beban lingkungan total (m/s)

Adanya tanda absolut menyatakan bahwa arah gaya harus dan pasti searah dengan arah arusnya. Kecepatan arus total adalah jumlah atau superposisi dari kecepatan arus akibat gelombang (*wave-induced current*) dan kecepatan arus pasut (*tidal current*).

Luas proyeksi pipa merupakan proyeksi pipa dari tampak depan tegak lurus arah arus.

Besar kecepatan dan percepatan partikel air ini didapat dari penurunan teori gelombang linear, teori *Stokes* orde-5, teori gelombang *Solitary*, teori gelombang *Cnoidal*, *steram function* dan sebagainya. Pemilihan teori gelombang yang akan digunakan bergantung pada karakteristik kondisi laut yang dimodelkan atau dilakukan analisis. Untuk penyederhanaan dalam tugas akhir ini, digunakan teori gelombang linear untuk memperoleh besar kecepatan dan percepatan partikel air dari penurunan terhadap potensial kecepatan.

- Gaya inersia (*Inertia Force*)

Gaya inersia terjadi pada struktur akibat gaya oleh perubahan perpindahan massa air yang disebabkan oleh keberadaan pipa. Faktor yang mempengaruhi gaya inersia adalah percepatan partikel air. Perubahan perpindahan massa diakibatkan oleh adanya fluktuasi percepatan arus. Nilai gaya inersia yang terjadi pada suatu struktur silinder dapat dituliskan dengan persamaan berikut ini.

$$F_I = C_M \times \frac{\pi D^2}{4} \times \rho_{seawater} \times \frac{dU}{dt} \quad (2.2)$$

Keterangan :

F_I : gaya inersia per satuan panjang (N/m)

C_I : koefisien inersia = $C_M + 1$

C_M : koefisien *added mass*

ρ : massa jenis air (kg/m³)

D : diameter terluar pipa (m)

$\frac{dU}{dt}$: percepatan *horizontal* beban lingkungan (m/s²)

- Gaya angkat (*Lift Force*)

Gaya hidrodinamika lainnya adalah gaya angkat (*lift force*). Gaya ini bekerja dalam arah tegak lurus arah rambatan

gelombang/arus. Gaya angkat ini terjadi akibat adanya konsentrasi *streamline* pada bagian atas pipa. Pada gambar 2.4, terlihat bahwa terdapat konsentrasi *streamline* di atas pipa. Konsentrasi *streamline* membuat kecepatan arus pada atas pipa tersebut menjadi besar, sehingga tekanan hidrodinamik mengecil, dan pipa menjadi terangkat. Jika terdapat celah antara pipa dan *seabed*, maka konsentrasi *streamline* akan terjadi, sehingga dengan proses yang sama pipa akan jatuh kembali, atau dengan kata lain gaya angkat yang terjadi bernilai negatif.

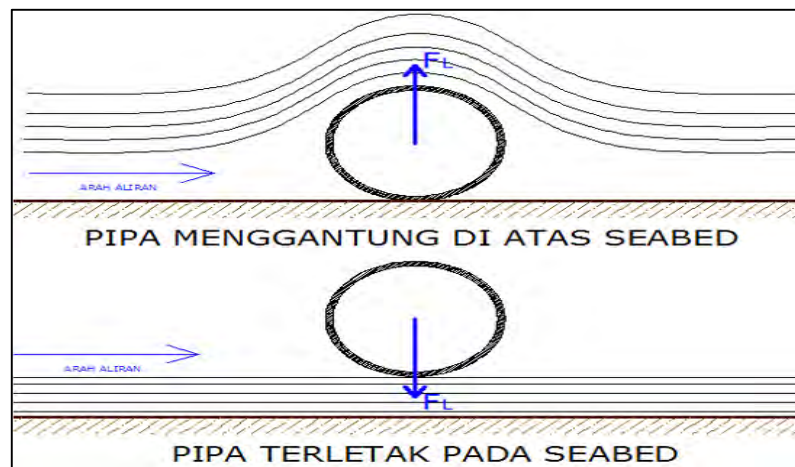
Maka, persamaan gaya angkat (*lift force*) yang terjadi adalah sebagai berikut.

$$F_L = C_L \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times |U|U \quad (2.3)$$

Keterangan :

F_L : gaya angkat per satuan panjang (N/m)

C_L : koefisien gaya angkat (*lift force coefficient*)



Gambar 2.4 Ilustrasi Konsentrasi *Streamline* yang Melewati Pipa (Pratama, 2007)

- Koefisien Gaya Hidrodinamika

Penentuan koefisien-koefisien C_D , C_L , C_M , dan C_L mengacu pada kode DNV 1981 mengenai *Rulues Of Submarine Pipeline System*. Besarnya koefisien-koefisien ini bergantung kepada parameter

karakteristik kondisi aliran dan pipa. Parameter-parameter yang mempengaruhi antara lain :

- Bilangan *Reynold*; $Re = \frac{U \cdot D}{\nu}$ (non-dimensional)
dimana ν merupakan viskositas kinematik yang bernilai $1.2363 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}$ atau $1.14856 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ pada air yang bersuhu 60°F.
- Bilangan *Keulegan-Carpenter*; $K_c = \frac{U_w \times T}{D}$, dimana T adalah periode gelombang (s)
- Kekasaran pipa, dengan parameter k/d , dimana k adalah tingkat kekasaran.
- Jarak antara pipa dengan batas tetap, dengan parameter H/D , dimana H adalah jarak.

Dari parameter-parameter diatas, maka besar koefisien-koefisien dapat ditentukan dari grafik-grafik pada gambar 2.5.

Selain itu, menurut referensi Guo (2005) dalam bukunya berjudul *Offshore Pipelines*, besar koefisien C_D dan C_L untuk pipa yang tergeletak di *seabed* dapat ditentukan dari grafik pada gambar 2.6.

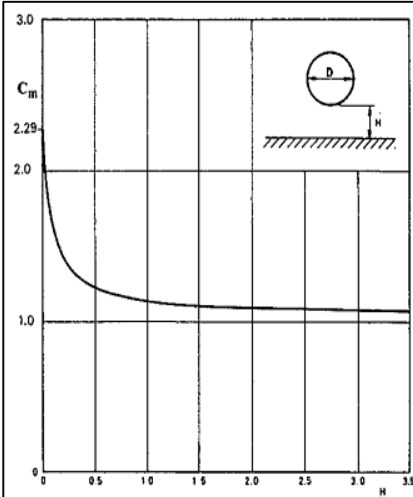


Fig. A.7. Recommended value of the added mass coefficient, C_m for a circular cylinder.

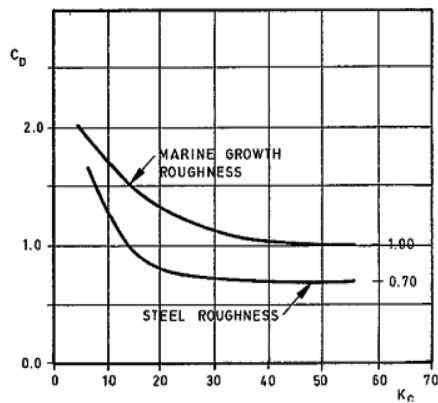


Fig. A.8. Drag coefficient for a circular cylinder in oscillatory flow.
Ref. A.4.

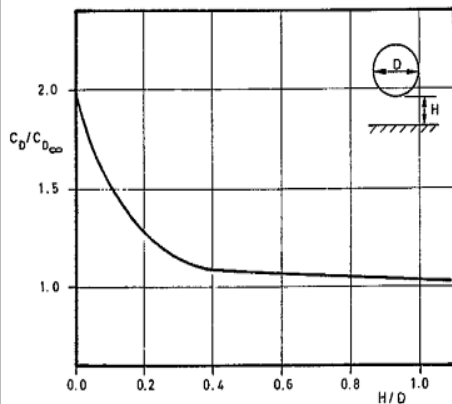


Fig. A.9. Influence of a fixed boundary on the drag coefficient of a circular cylinder in oscillatory supercritical flow, $K_c > 20$, $R_k = 10^5 - 2 \cdot 10^6$.
Ref. A.5, A.6 and A.7.

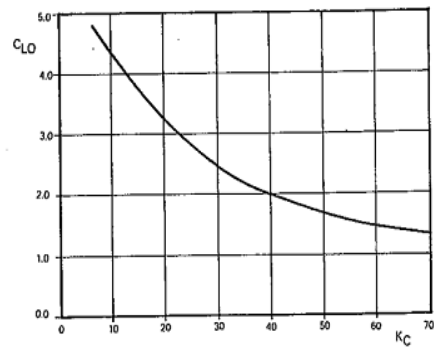


Fig. A.10. Lift coefficient for a circular cylinder at a fixed boundary in oscillatory flow.
Ref. A.5, A.6 and A.7.

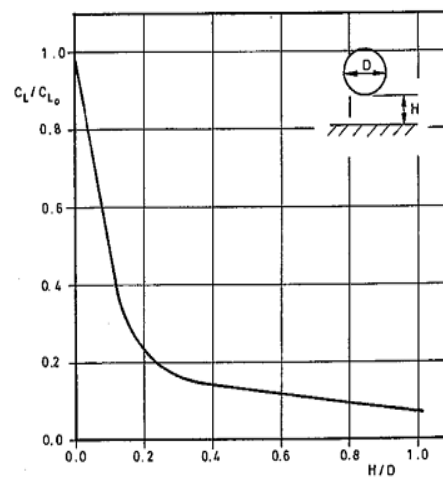
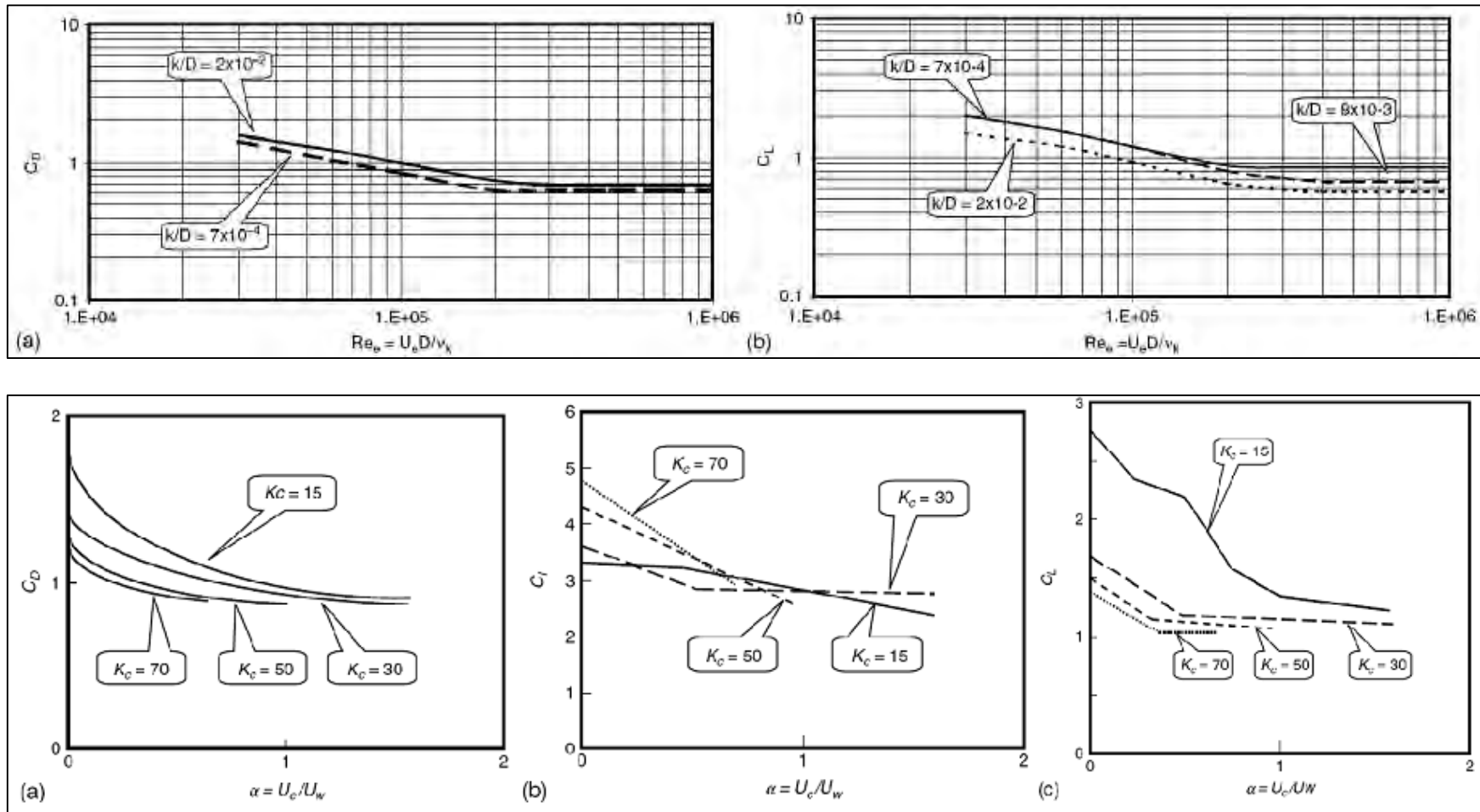


Fig. A.11. Variation of lift force coefficient as a function of the distance from a fixed boundary.
Ref. A.5, A.6 and A.7.

	k (meters)
Steel, new uncoated:	$5 \cdot 10^{-5}$
Steel, painted:	$5 \cdot 10^{-6}$
Steel, highly rusted:	$3 \cdot 10^{-3}$
Concrete:	$3 \cdot 10^{-3}$
Marine growth:	$5 \cdot 10^{-1} - 5 \cdot 10^{-2}$

Gambar 2.5 Penentuan Koefisien Hidrodinamika (DNV-Submarine Pipelines System, 1981)



Gambar 2.6 Koefisien Hidrodinamika untuk Arus dan Gelombang yang Bekerja Bersamaan pada *On-Bottom Pipe* (Guo, 2005)

Dari grafik-grafik di atas maka besar koefisien hidrodinamika dapat ditentukan. Akan tetapi berlaku beberapa syarat dan penyederhanaan mengacu pada DNV (1981) mengenai “*Rules of Submarine Pipelines System*” sebagai berikut :

- Besar koefisien hidrodinamik yang diambil sebaiknya dari hasil percobaan model fisik.
- Untuk pipa yang tidak dipengaruhi oleh batas tetap seperti *seabed*, contohnya pada *free span*, maka koefisien added mass $C_M = 1$.
- Koefisien drag C_D adalah fungsi dari bilangan Keulegan-carpenter KC untuk pipa *smooth* yang tertutupi oleh *marine growth* hanya untuk kondisi aliran superkritis (*Fig. A.8*) berdasarkan bilangan *Reynolds*, dan hanya *valid* untuk aliran yang bebas dari batas tetap (*seabed*).
- Besar koefisien geser C_D pada arus *steady* untuk nilai KC tak hingga adalah asimtot dari kurva pada grafik.
- Untuk pipa yang dekat dengan batas bebas (*seabed*), maka besar koefisien geser C_D harus dikalikan dengan faktor koreksi pada (*Fig. A.9*).
- Besar koefisien gaya angkat C_L untuk aliran *steady* = 1.
- Untuk pipa yang dekat dengan batas bebas (*seabed*), maka besar koefisien gaya angkat C_L harus dikalikan dengan faktor koreksi pada (*Fig. A.11*).

Untuk keperluan praktis, berdasarkan bilangan *Reynolds* untuk pipa terekspos pada aliran *steady*, maka koefisien hidrodinamika dapat diambil dari tabel 2.1 berikut ini.

Tabel 2.1 Rekomendasi Koefisien Hidrodinamika untuk Aliran *Steady* (Mouselli, 1981)

Re	C_D	C_L	C_M
$Re < 5.0 \times 10^4$	1.3	1.5	2.0
$5.0 \times 10^4 < Re < 1.0 \times 10^5$	1.2	1	2.0
$1.0 \times 10^5 < Re < 2.5 \times 10^5$	$1.53 - (Re / 3.0 \times 10^5)$	$1.2 - (Re / 5.0 \times 10^5)$	2
$2.5 \times 10^5 < Re < 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	$2.5 - (Re / 5.0 \times 10^5)$
$Re > 5.0 \times 10^5$	0.7	0.7	1.5

b. Arus

Beban arus yang terdiri dari data kecepatan dan arah arus didapat dari pengukuran di laut. Pengukuran pada suatu rute pipa bawah laut dibagi menjadi beberapa zona pengukuran. Dengan memperhitungkan efek *boundary layer*, maka alat pengukur (*current meter probe*) diletakkan pada suatu elevasi referensi. Data arus yang diperoleh bersifat diskrit, per detik, per menit atau per jam. Dari data diskrit ini lalu dilakukan analisis spektrum kecepatan dan diambil rata-ratanya. Asumsi yang digunakan adalah arus dianggap *steady current*, yang terdiri dari;

- Arus pasang surut.
- *Wind induced current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.
- *Storm surge induced current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.
- *Density driven current*, diabaikan dalam Tugas Akhir ini.

Untuk perairan dengan kedalaman lebih dari 100 m, arus memiliki dua karakteristik berbeda, sebagai *driving agent* dan *steering agent*. *Driving agent* adalah arus pasang surut, dimana gradien tekanan disebabkan oleh elevasi permukaan atau perubahan tekanan, angin dan gaya *storm surge*. *Steering agent* adalah arus yang terjadi karena pengaruh topografi dan gaya rotasi bumi.

Selain itu, jenis aliran arus dibagi menjadi dua zona, yaitu :

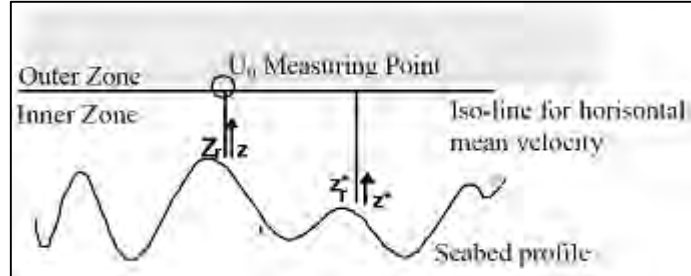
a. *Outer zone*

Merupakan zona aliran yang terjadi pada elevasi yang jauh dari dasar laut, dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran hanya sedikit bervariasi dalam arah horizontal. *Outer zone* ini terletak pada suatu bentuk *seabed* yang membentuk suatu puncak atau lebih tinggi dari lembah *seabed*. Pada suatu *seabed* yang rata/flat, *outer zone* diasumsikan terletak pada ketinggian $3600 z_0$ dari *seabed*. Nilai z_0 dilihat pada tabel 2.2.

b. *Inner zone*

Merupakan zona aliran dimana rata-rata kecepatan arus dan turbulensi aliran menunjukkan variasi secara signifikan dalam

arah horizontal. Kecepatan dan arah arus adalah fungsi dari geometri lokal dasar laut. Pada *inner zone*, profil kecepatan arus dianggap logaritmik karena tidak terjadi pemisahan aliran.



Gambar 2.7 Definisi Satuan pada Analisis Data Arus (DNV-RP-F105, 2002)

Untuk kasus dalam Tugas Akhir ini, jenis aliran yang terjadi berada pada *inner zone*. Adapun adalah persamaan profil kecepatan arus adalah berikut ini.

$$U(z) = U(z_r) \cdot R_c \cdot \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} \quad (2.4)$$

Keterangan :

$U(z)$: kecepatan arus yang dihitung dari atas *seabed* hingga ke permukaan *free span* (m/s)

$U(z_r)$: kecepatan arus berdasarkan perhitungan ketinggian dari *outer zone* (m/s)

R_c : *reduction factor* : $R_c = \sin(\theta_{rel})$

z_r : ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga ke permukaan *free span* (m)

z_0 : parameter kekasaran *seabed* (m)

z : ketinggian di atas *seabed* hingga permukaan pipa (m)

θ_{curr} : sudut datang arus terhadap *free span* ($^\circ$)

Untuk nilai dari Z_0 (parameter kekasaran *seabed*), dapat dilihat pada tabel dibawah ini yang diambil dari DNV-RP-F105 tahun 2002 mengenai *Free Spanning Pipelines*.

Tabel 2.2 Parameter Kekasaran *Seabed* (DNV RP F105, 2002)

Tipe Tanah	Kekasaran Z_o (m)
Silt and clay	$5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	$1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	$1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$3 \cdot 10^{-4}$
Pebbel	$2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$4 \cdot 10^{-2}$

2.2.5 Kriteria Aliran

Dengan telah diketahuinya besar kecepatan arus dan partikel gelombang, maka besar kecepatan arus total tersebut harus diklasifikasikan untuk pengambilan langkah analisis selanjutnya. Dasar dari pembagian kriteria ini adalah rasio antara kecepatan arus dan kecepatan partikel gelombang yaitu sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{U_c}{U_w + U_c} \quad (2.5)$$

Keterangan :

U_c : kecepatan arus (m/s)

U_w : kecepatan gelombang (m/s)

Rasio dari kecepatan arus dan kecepatan partikel ini merupakan faktor yang menentukan dampak aliran arus terhadap pipa. Adanya aliran yang melewati pipa menyebabkan pipa memiliki respon, dalam arah *in-line* (searah arus) dan arah *cross-flow* (tegak lurus vertikal arah arus). Tabel 2.3 menjelaskan kriteria respon dan dampak terhadap pipa berdasarkan rasio kecepatan arus dan gelombang.

Klasifikasi ini menunjukkan bahwa pengaruh arus dan gelombang memberikan pengaruh respon yang berbeda terhadap pipa. Kecepatan arus merupakan tipe *steady current*, sedangkan kecepatan partikel gelombang merupakan *oscillatory current*, yang besarnya berkurang dengan bertambahnya kedalaman.

Tabel 2.3 Kriteria Respon Pipa Terhadap Rasio Aliran Arus (DNV-RP-F105, 2002)

$\alpha < 0.5$	<u>Gelombang Dominan</u> ($U_w > U_c$)
	<u>Arah <i>In-line</i> :</u> Pembebanan arah <i>in-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison. <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex sheeding</i> diabaikan
	<u>Arah <i>Cross-flow</i> :</u> Beban arah <i>cross-flow</i> dominan disebabkan oleh <i>vortex sheeding</i> asimetris
$0.5 < \alpha < 0.8$	<u>Gelombang Dominan</u> ($U_w < U_c$)
	<u>Arah <i>In-line</i> :</u> Pembebanan <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison <i>In-line</i> VIV akibat <i>vortex sheeding</i> berkurang dengan keberadaan gelombang
	<u>Arah <i>Cross-flow</i> :</u> Beban <i>cross-flow</i> dominan disebabkan oleh <i>vortex sheeding</i> asimetris dan menunjukkan situasi arus yang dominan
$\alpha \wedge 0.8$	<u>Arus Dominan</u> ($U_c \gg U_w$)
	<u>Arah <i>In-line</i> :</u> Pembebanan <i>In-line</i> berdasarkan <i>steady drag component</i> dan <i>oscillatory component</i> akibat <i>vortex sheeding</i> . Pembebanan <i>In-line</i> dihitung berdasarkan persamaan Morrison diabaikan
	<u>Arah <i>cross-flow</i> :</u> Pembebanan arah <i>cross-flow</i> secara siklik akibat <i>vortex sheeding</i> , dan menunjukkan situasi arus murni yang dominan

2.2.6 Analisis *Free Span* Statik Pipa Bawah Laut

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, analisis terhadap *free span* pada pipa bawah laut dilakukan terhadap dua kriteria utama, yaitu *Fatigue Limit State* dan *Ultimate Limit State*. Analisis dikerjakan pada dua kondisi berbeda, yaitu kondisi statis dan dinamik.

Pada suatu pipa bawah laut, di bentang bebas tersebut terjadi tegangan dengan besar tertentu akibat massa pipa yang tidak tertumpu oleh *seabed*. Bentang bebas yang terlalu panjang dapat menyebabkan tegangan berlebihan (*excessive yielding*) pada pipa. Dengan asumsi kedua ujung pipa pada bentang bebas bertumpu pada perletakan sederhana, maka panjang bentang *free span* statik dapat ditentukan berdasarkan persamaan berikut.

$$L_{st} = \sqrt{\frac{2 \cdot C \cdot I \cdot \sigma_e}{W_t \cdot D}} \quad (2.6)$$

Keterangan

- L_{st} : panjang *free span* statik yang diijinkan (m)
 C : konstanta ujung peletakan
 I : *momen inertia* penampang pipa (m⁴)
 σ_e : tegangan ekuivalen (*von mises stress*) (N/m²)
 W_t : berat pipa terdistribusi merata per satuan panjang (N/m)
 D_{tot} : diameter total terluar pipa (m)

Untuk nilai W_t , dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$W_t = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2} \quad (2.7)$$

Keterangan :

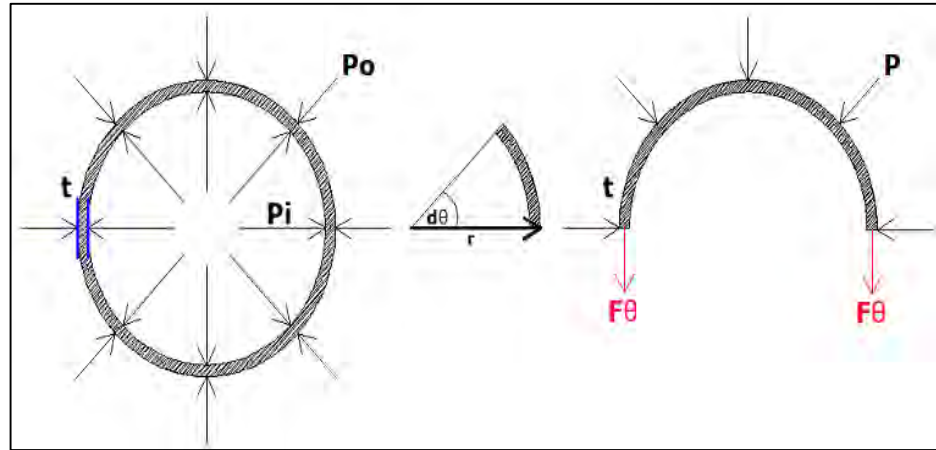
- W_{sub} : berat pipa terendam dalam air per satuan panjang (*submerged weight*) (N/m)
 F_D : gaya *drag* per satuan panjang (N/m)
 F_I : gaya *inertia* per satuan panjang (N/m)

Tegangan ekuivalen atau disebut juga tegangan *von mises*, merupakan resultan total tegangan yang terjadi pada pipa, akibat *longitudinal stress*, *hoop stress*, dan *bending stress*.

a. *Hoop Stress*

Hoop stress adalah tekanan internal yang diakibatkan oleh fluida yang mengalir di dalam pipa. Pada pipa bawah laut, tekanan akibat fluida

diimbangi oleh tekanan eksternal yang diakibatkan oleh gaya hidrostatik yang arahnya berlawanan. Ilustrasi *Hoop stress* yang bekerja pada pipa dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Ilustrasi Tekanan Internal dan Tekanan Eksternal pada Pipa Bawah Laut (Pratama, 2007)

Hoop Stress dapat ditentukan melalui :

$$\sigma_h = \frac{DP_i}{2t} \quad (2.8)$$

Keterangan :

- σ_h : *hoop stress* (N/m²)
- P_i : *internal pressure* (N/m²)
- D : diameter luar pipa (m)
- t : ketebalan pipa (m)

Tekanan di dalam pipa dapat dihitung dengan persamaan berikut ini (Semedi, 2005) :

$$P_i = \frac{(2 \cdot SMYS \cdot t)}{D} F \cdot E \cdot T \quad (2.9)$$

Keterangan :

- P_i : tekanan dalam desain (N/m²)
- $SMYS$: *Specified Minimum Yield State* (N/m²)
- t : tebal pipa (m)
- D : diameter pipa (m)

- F : faktor desain (untuk riser dan pipelines = 0.8)
 E : *longitudinal joint factor* (untuk material API 5L = 1.0)
 T : *temperature derating factor* (untuk suhu kurang dari 250°F = 1.0)

Untuk harga Pd yang maksimal, maka untuk E dan T diasumsikan sama dengan 1. Untuk perhitungan tegangan ini juga menggunakan *code* standar dari ASME B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*. Dimana, untuk tegangan ijinnya sendiri memiliki batasan-batasan tersendiri yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2.4 *Allowable Stress* untuk Kondisi Operasi (ASME, 2000)

Design Condition	Allowable		
	Hoop Stress	Longitudinal Stress	Combined Stress
Operation	72 % SMYS	80% SMYS	90 % SMYS
Hydrotest	90% SMYS	72 % SMYS	96 % SMYS
Installation	72 % SMYS	80 % SMYS	90 % SMYS

Sebagai catatan, yang menjadi perhatian dalam Tugas Akhir adalah tegangan yang bekerja hanya pada kondisi operasional saja.

b. Tegangan *Longitudinal*

Hal yang terpenting dalam *analisis* tegangan *longitudinal* adalah dengan meninjau apakah *pipeline* berada dalam kondisi tertahan (*restraint*) atau tidak tertahan (*unrestraint*). Sebelum pipa mengalami *upheaval buckling*, pipa berada dalam kondisi tertahan. Pada kondisi ini, pipa tidak dapat berekspansi karena tertahan oleh gaya friksi tanah di sekeliling pipa tersebut, tegangan *longitudinal* merupakan tegangan yang timbul sebagai kombinasi pengaruh 2 komponen sebagai berikut :

➤ Tegangan kompresif akibat ekspansi termal

Perbedaan temperatur saat instalasi dan operasi *pipeline* menyebabkan timbulnya ekspansi termal dalam arah *longitudinal* pipa. Namun karena *pipeline* berada dalam kondisi yang disebut

restrained pipeline, maka pipa tidak dapat mengalami ekspansi sehingga timbul tegangan tekan termal sebagai berikut.

$$\sigma_T = -E\alpha (T_2 - T_1) \quad (2.10)$$

Keterangan :

σ_T : *thermal stress* (N/m²)

E : *modulus young* = $2,07 \times 10^{11}$ (N/m²)

α : koefisien ekspansi termal = $11,7 \times 10^{-6}$ (°C⁻¹)

T_2 : temperatur operasi (°C)

T_1 : temperatur instalasi (°C)

➤ Tegangan *tensile*

Pada saat pipa beroperasi atau bertekanan, maka tekanan internal di dalam pipa akan menimbulkan tegangan *hoop* dan tegangan *longitudinal*. Namun dapat terbentuk tegangan lain sebagai reaksi tegangan dari tegangan *hoop* atau tegangan *longitudinal* akibat tekanan internal pipa. Hal ini tergantung pada kondisi pipa tertahan atau tidak, atau sering disebut *restraint* dan *unrestraint*.

a. Tegangan *longitudinal* pada pipa *restraint*

Pada pipa yang berada pada kondisi tertahan, maka akan timbul reaksi tegangan tarik akibat pengaruh *Poisson* dari tegangan *hoop*. Sebagaimana diketahui bahwa pengaruh *Poisson* menggambarkan rasio regangan yang terjadi pada arah melintang terhadap regangan pada arah *longitudinal*. Dengan kata lain, tegangan *hoop* akan menimbulkan pengaruh tegangan tarik *Poisson* pada arah *longitudinal*. Tegangan tarik *longitudinal* akibat pengaruh *Poisson* pada pipa kondisi tertahan adalah sebagai berikut :

$$\sigma_P = \nu \sigma_h \quad (2.11)$$

Keterangan :

σ_P : *poissons stress* (N/m²)

ν : *poisson's ratio* = 0,3

σ_h : tegangan *hoop* (N/m²)

b. Tegangan *longitudinal* pada pipa *unrestrained*

Sedangkan pada kondisi pipa *unrestraint*, maka akan terbentuk tegangan *longitudinal* sebagai pengaruh langsung dari tekanan internal di dalam pipa. Teori tegangan ini bersesuaian dengan tegangan *longitudinal* yang terjadi pada bejana tipis seperti yang telah diuraikan sebelumnya. Adapun tegangan *longitudinal* akibat tekanan internal pada pipa kondisi tidak tertahan adalah :

$$\sigma_L = \frac{P D_0}{4t} = \frac{\sigma_h}{2} \quad (2.12)$$

Keterangan :

σ_L : tegangan *longitudinal* (N/m²)

P : tekanan internal pipa (N/m²)

D_0 : diameter eksternal pipa (m)

t : ketebalan pipa (m)

σ_h : *hoop stress* (N/m²)

Melalui kedua komponen tegangan termal dan tegangan pengaruh *Poisson* ini, maka tegangan *longitudinal* pada pipa yang berada dalam kondisi *restraint* adalah sebagai berikut :

$$\sigma_L = v \sigma_h - E \alpha (T_2 - T_1) \quad (2.13)$$

Keterangan :

σ_L : *hoop stress* (N/m²)

v : *poisson's ratio* = 0,3

σ_h : *hoop stress* (N/m²)

E : *modulus young* = 2,07 x 10⁵ (N/m²)

α : koefisien ekspansi termal = 11,7 x 10⁻⁶ (°C⁻¹)

T_1 : temperatur instalasi (°C)

T_2 : temperatur operasi (°C)

c. Tegangan ekuivalen (*von mises*)

Tegangan – tegangan yang bekerja pada arah yang berbeda – beda pada pipa dapat dipandang secara menyeluruh dengan menggunakan

hubungan keseluruhan sehingga persamaan sebagai berikut sebagai berikut :

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - (\sigma_h \sigma_L) + 3\tau^2} \quad (2.14)$$

Keterangan :

- σ_E : tegangan ekivalen (N/m²)
- σ_h : tegangan *hoop* (N/m²)
- σ_L : tegangan *longitudinal* (N/m²)
- τ : tegangan geser tangensial (N/m²)

Tegangan geser tangensial biasanya relatif kecil dibandingkan dengan tegangan – tegangan lain yang bekerja sehingga dapat diabaikan dalam analisis selanjutnya, sehingga persamaan dapat direduksi menjadi :

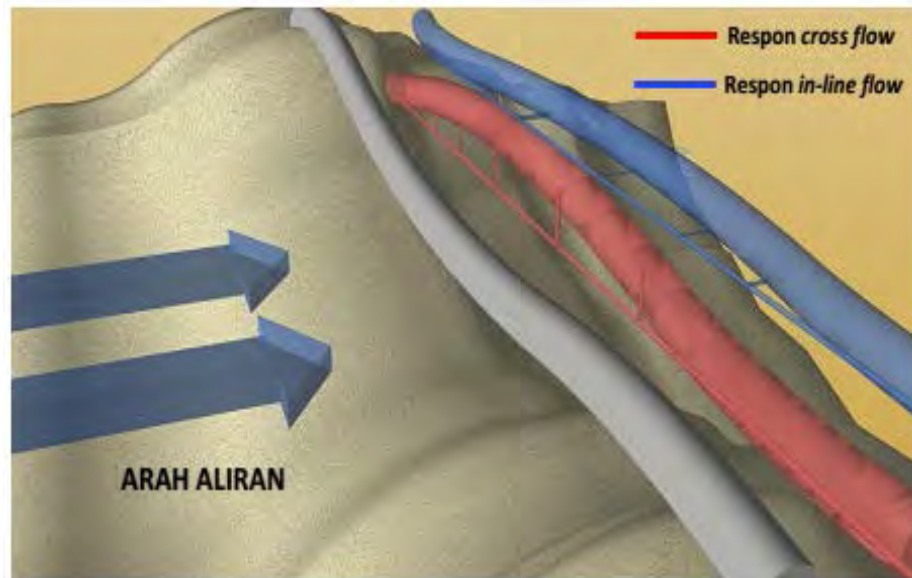
$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2 - (\sigma_h \sigma_L)} \quad (2.15)$$

Tegangan ekivalen pada saat pipa beroperasi haruslah memenuhi kriteri tegangan ekivalen yang diijinkan. Tegangan ekivalen yang diijinkan didasarkan pada kriteria *code* standar ASME B.31.2000 yang digunakan sebagai berikut :

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2} < 0,9SYMS \quad (2.16)$$

2.2.7 Analisis *Free Span* Dinamik Pipa Bawah Laut

Telah dijelaskan sebelumnya, respon pipa pada suatu sistem *free span* dinamik diklasifikasikan menjadi dua jenis; yaitu dalam arah *in-line* (searah aliran) dan arah *cross-flow* (tegak lurus aliran) yang diperlihatkan pada gambar 2.9. Respon dinamik yang terjadi pada suatu *free span* adalah osilasi dalam dua arah tersebut. Osilasi ini terjadi akibat adanya resonansi *vortex shedding* yang terbentuk di sekitar pipa. *Vortex shedding* ini menyebabkan perubahan tekanan secara periodik pada sekitar pipa, sehingga pipa berosilasi, dengan terangkat atau bergeser dan kembali ke posisi awalnya. Fenomena ini dinamakan *Vortex Induced Vibration* (VIV).



Gambar 2.9 Sketsa Kategori Respon *Free Span* Dinamik (Pratama, 2007)

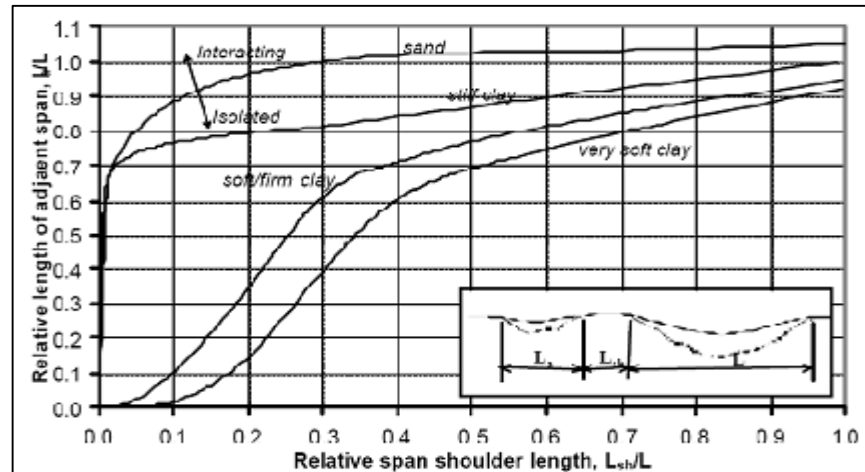
Dalam analisis dinamis untuk *free span*, berdasarkan DNV-RP-F105 tahun 2002 mengenai *Free Spanning Pipelines*, terdapat beberapa parameter yang harus diperhatikan, yaitu sebagai berikut :

a. Klasifikasi morfologi *seabed*

Objek dari morfologi *seabed* adalah untuk menentukan apakah *free span* terisolasi atau berinteraksi. Klasifikasi morfologi ini ditentukan berdasarkan tingkat kerumitan atau kompleksitas untuk analisis selanjutnya. Kriteria ini adalah :

- Dua atau lebih *free span* yang berurutan/berdampingan dianggap terisolasi (masing-masing) jika perilaku dan karakteristik statik dan dinamikanya tidak dipengaruhi oleh *span* disebelahnya.
- Rangkaian suatu *free span* dikatakan saling berinteraksi jika perilaku dan karakteristik statik dan dinamikanya terpengaruhi oleh keberadaan *span* di sebelahnya. Dalam hal ini maka lebih dari satu *span* yang harus dimodelkan dalam pemodelan perilaku dan interaksi *pipe-seabed*.

Klasifikasi morfologi ini harus ditentukan secara umum berdasarkan analisis statik dan dinamik. Gambar 2.10 dibawah ini mengklasifikasikan *span* dari jenis tanah *seabed*nya.



Gambar 2.10 Klasifikasi Morfologi Interaksi *Free Span* (DNV-RP-F105, 2002)

Untuk analisis yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini, digunakan asumsi bahwa hanya satu *span* tunggal yang akan dilakukan analisis. Interaksi antar *span* yang melewati gundukan (*low depression*) dianggap tidak ada. Analisis hanya dilakukan pada satu *span*, secara statik dan dinamik.

b. Klasifikasi respon pipa pada *free span*

Klasifikasi respon pipa pada suatu *free span* ditentukan berdasarkan rasio L (panjang *span*) dan D (diameter terluar pipa). Kriteria L/D ini diberikan oleh DNV-RP-F105 dengan klasifikasi pada tabel 2.5.

Tabel 2.5 Klasifikasi Respon *Free Span* (DNV-RP-F105, 2002)

L/D	Jenis Respon
$L/D < 30$	<p>Amplifikasi dinamik sangat kecil</p> <p>Secara umum, analisis fatigue tidak perlu dilakukan. Beban lingkungan dianggap tidak signifikan untuk menyebabkan respon dinamik pipa dan VIV tidak akan terjadi.</p>
$30 < L/D < 100$	<p>Respon didominasi oleh perilaku balok (beam)</p> <p>Merupakan tipikal panjang span untuk kondisi operasi</p> <p>Frekuensi natural sensitif terhadap kondisi batas dan gaya aksial efektif.</p>
$100 < L/D < 200$	<p>Respon didominasi oleh perilaku kombinasi balok dan kabel</p> <p>Keadaan yang relevan untuk <i>free span</i> pada <i>uneven seabed</i> untuk sementara.</p> <p>Frekuensi natural sensitif terhadap kondisi batas, gaya aksial efektif, termasuk defleksi awal dan kekakuan geometrik.</p>
$L/D > 200$	<p>Respon didominasi oleh perilaku kabel</p> <p>Keadaan relevan untuk pipa berdiameter kecil pada kondisi sementara.</p> <p>Frekuensi natural dipengaruhi oleh bentuk terdefleksi dan gaya aksial efektif.</p>

c. Parameter kestabilan

Salah satu bagian penting dalam menganalisis gerak akibat *vortex* adalah parameter kestabilan atau *stability parameter*. Parameter ini digunakan untuk menentukan respon maksimal akibat beban hidrodinamis. Persamaannya adalah sebagai berikut :

$$K_s = \frac{4 \pi m_e \zeta_T}{\rho D^2} \quad (2.17)$$

Keterangan :

- K_s : *stability parameter*
 m_e : massa efektif pipa per satuan panjang (kg/m)
 ζ_T : rasio peredaman total
 ρ : *density* air laut (kg/m³)
 D : diameter terluar pipa (m)

d. Massa efektif

Massa efektif pipa adalah total dari masa pipa termasuk *coating*, masa fluida dalam pipa dan masa air laut yang dipindahkan oleh pipa. Dapat ditulis dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$m_e = m_p + m_f + m_a \quad (2.18)$$

Keterangan :

- m_e : massa efektif per satuan panjang (kg/m)
 m_p : massa pipa termasuk *coating* per satuan panjang (kg/m)
 m_f : massa fluida dalam pipa per satuan panjang (kg/m)
 m_a : massa yang di tambahkan per satuan panjang (kg/m)

Massa pipa termasuk *coating* dihitung sebagai berikut :

$$M_{struktur} = M_{pipa} + M_{coat} + M_{concrete} \quad (2.19)$$

$$M_{pipa} = \frac{\pi}{4} [OD^2 - (OD - 2t_{pipa})^2] \rho_{pipa} \quad (2.20)$$

$$M_{coat} = \frac{\pi}{4} [(OD + 2t_{coat})^2 - OD^2] \rho_{coat} \quad (2.21)$$

$$M_{concrete} = \frac{\pi}{4} [(OD + 2t_{coat} + 2t_{concrete})^2 - (OD + 2t_{coat})^2] \rho_{concrete} \quad (2.22)$$

Keterangan :

- $M_{struktur}$: massa total struktur pipa (kg/m)
 M_{pipa} : massa pipa (kg/m)
 M_{coat} : massa lapisan *coating* (kg/m)
 $M_{concrete}$: massa lapisan *concrete* (kg/m)
 OD : diameter terluar pipa (m)
 ρ_{coat} : *corrosion coating density* (kg/m³)
 t : tebal pipa (m)

Massa fluida dalam pipa di hitung sebagai berikut :

$$M_{fluida} = \frac{\pi}{4} \times ID^2 \times \rho_{fluida} \quad (2.23)$$

Keterangan :

- M_{fluida} : massa fluida dalam pipa (kg/m)
 ID : diameter dalam pipa (m)
 ρ : massa jenis (kg/m³)

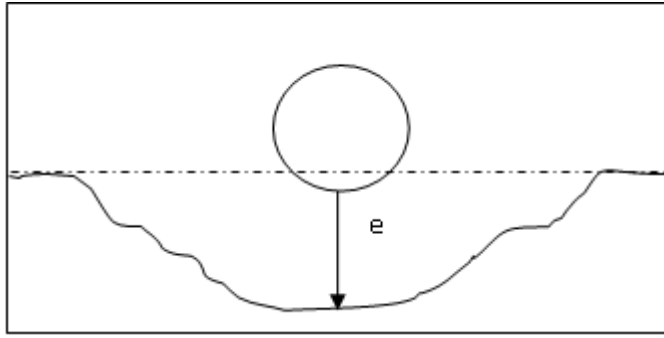
Massa yang ditambahkan atau (*added mass*) dihitung sebagai berikut :

$$M_a = C_a \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \rho \quad (2.24)$$

$$C_a = 0,68 + \left[\frac{1,6}{1 + 5 \left(\frac{e}{D} \right)} \right] \quad (2.25)$$

Keterangan :

- M_a : massa yang ditambahkan (kg/m)
 C_a : koefisien massa yang ditambahkan
 D : diameter terluar pipa (m)
 ρ : massa jenis air laut (kg/m³)
 e : *gap free span*, dengan ilustrasi seperti pada gambar di bawah ini (m)



Gambar 2.11 Ilustrasi *Span Gap* (DNV-RP-F105, 2002)

e. Kriteria *screening fatigue*

Screening fatigue yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini mengacu pada DNV-RP-F105. Kriteria *screening* adalah meninjau terjadinya *fatigue* akibat VIV yang disebabkan oleh beban gelombang secara langsung dan kombinasi beban arus & gelombang secara bersamaan. Kriteria *fatigue* ini telah dikalibrasikan dengan analisis *fatigue* lengkap untuk memastikan usia *fatigue* lebih dari 50 tahun.

Jika suatu *free span* tidak memenuhi kriteria *screening*, maka harus dilakukan analisis *fatigue* berdasarkan *Fatigue Limit State* (FLS). Namun, *screening fatigue* hanya merupakan langkah analisis yang harus dikerjakan, karena *free span* pipa pada studi kasus ini akan ditinjau umur dan kerusakan kelelahannya.

Secara umum, terdapat beberapa kriteria yang harus dipenuhi oleh sebuah *free span* dalam *screening fatigue* ini. Kriteria *screening* untuk respon dalam arah *in-line* adalah:

$$\frac{f_{o,IL}}{\gamma_f} > \frac{U_{c,100yr}}{V_{R,onset}^{IL} \times D} \times \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \times \frac{\gamma_{IL}}{\alpha} \quad (2.26)$$

Keterangan :

- $f_{o,IL}$: frekuensi natural *free span* untuk arah *in-line* (Hz)
- L : panjang *free span* (m)
- D : diameter terluar *free span* (m)
- γ_f : faktor keamanan (SF) untuk frekuensi natural; tabel 2.7
- γ_{IL} : faktor *screening* untuk arah *in-line*; tabel 2.6

$U_{c,100\text{ year}}$: kecepatan arus rata-rata untuk periode kembali 100 tahun (m/s)

$\bar{\alpha}$: rasio aliran arus : $\bar{\alpha} = \max\left(\frac{U_{c,100\text{ years}}}{U_{w,1\text{ years}} + U_{c,100\text{ years}}}; 0.6\right)$

$U_{w,1\text{ year}}$: kecepatan aliran yang diakibatkan gelombang naik untuk periode kembali 1 tahun (m/s)

$V_{R,onset}^{IL}$: nilai permulaan (*onset*) *in-line* untuk *reduced velocity*

Nilai permulaan *in-line* untuk *reduced velocity* ditentukan oleh persamaan berikut ini :

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{1}{\gamma_{on,IL}}\right) & \text{untuk } K_{sd} < 0,4 \end{cases} \quad (2.27)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{0,6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}}\right) & \text{untuk } 0,4 < K_{sd} \end{cases} \quad (2.28)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \left(\frac{2,2}{\gamma_{on,IL}}\right) & \text{untuk } K_{sd} > 1,6 \end{cases} \quad (2.29)$$

Keterangan :

$\gamma_{on,IL}$: *safety factor* pada permulaan (*onset*) untuk *in-line*, lihat tabel 2.7

K_{sd} : *stability parameter factor* untuk perancangan $= \frac{K_s}{\gamma_k}$

γ_k : *safety factor* pada *stability parameter*, lihat tabel 2.7

Sedangkan, kriteria *screening* untuk respon dalam arah *cross-flow* adalah:

$$\frac{f_{0,CF}}{\gamma_f} > \frac{U_c + U_w}{V_{R,onset}^{CF} \times D} \times \gamma_{CF} \quad (2.30)$$

Keterangan :

$f_{0,CF}$: frekuensi alami *cross-flow* (Hz)

γ_{CF} : *screening criteria* untuk *cross-flow*, lihat tabel 2.6

$V_{R,onset}^{CF}$: nilai permulaan (*onset*) *cross-flow* untuk *reduced velocity*

Nilai permulaan *cross-flow* untuk *reduced velocity* dapat diperoleh dari persamaan berikut ini :

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \times \psi_{proxy,onset} \times \psi_{mass,onset} \times \psi_{\alpha,onset}}{\gamma_{on,CF}} \quad (2.31)$$

Keterangan :

$V_{R,onset}^{CF}$: nilai permulaan (*onset*) *cross-flow* untuk *reduced velocity*

$\psi_{proxy,onset}$: faktor koreksi untuk dekatnya dasar laut (*seabed proximity*)

$\psi_{mass,onset}$: faktor koreksi untuk massa

$\psi_{current,onset}$: faktor koreksi untuk kecepatan arus

Faktor koreksi untuk dekatnya dasar laut dipengaruhi oleh perbandingan *gap* terhadap diameter terluar pipa. Faktor koreksi untuk dekatnya dasar laut ini dapat dihitung dari persamaan berikut ini :

$$\psi_{proxi,onset} = \begin{cases} \frac{1}{4} \times \left(3 + \left(1.25 \times \frac{e}{D} \right) \right) ; & \text{untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & ; \text{untuk } \frac{e}{D} \geq 0.8 \end{cases} \quad (2.32)$$

Keterangan :

$\psi_{proxy,onset}$: faktor koreksi untuk dekatnya dasar laut (*seabed proximity*)

e : *span gap* (m)

D : diameter terluar pipa (m)

Faktor koreksi untuk massa dihitung berdasarkan persamaan berikut ini

$$\psi_{mass,onset} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \times M_{ratio} ; & \text{untuk } M_{ratio} < 1.5 \\ 1 & ; \text{untuk } M_{ratio} \geq 1.5 \end{cases} \quad (2.34)$$

Keterangan :

M_{ratio} : perbandingan massa struktur dengan massa *bouy* = $\frac{M_{struktur}}{M_{bouy}}$

Faktor koreksi untuk kecepatan arus dihitung berdasarkan persamaan berikut ini :

$$\psi_{\alpha, onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3} ; & \text{untuk } \alpha < 1.5 \\ 1.167 ; & \text{untuk } \alpha \geq 1.5 \end{cases} \quad (2.36)$$

$$(2.37)$$

Keterangan :

α : rasio aliran arus

Kriteria tambahan lainnya, analisis *fatigue* akibat beban gelombang langsung tidak perlu dilakukan, jika :

$$\frac{U_c}{U_w + U_c} > \frac{2}{3} \quad (2.38)$$

Kriteria diatas berlaku jika kriteria screening untuk *in-line* VIV terpenuhi. Jika tidak, maka harus dilakukan analisis *fatigue* akibat *in-line* VIV dan beban gelombang langsung.

Tabel 2.6 Faktor Keamanan *Screening Criteria* (DNV-RP-F105, 2002)

FOR SCREENING CRITERIA	SYMBOL	VALUE
In-Line motion	γ_{IL}	1.4
Cross-Flow motion	γ_{CF}	1.4

Tabel 2.7 Faktor Keamanan *Screening Fatigue* (DNV-RP-F105, 2002)

SAFETY FACTOR		
FOR FATIGUE	SYMBOL	VALUE
Natural Frequency	γ_f	1.2
Stabilitas Parameter	γ_k	1.15
VIV Onset of In-Line	$\gamma_{on, IL}$	1.1
VIV Onset of Cross-Flow	$\gamma_{on, CF}$	1.2
Structural Damping Ratio	ζ_{str}	0.005
Soil Damping Ratio	ζ_{soil}	3
Hydrodynamic Damping Ratio	ζ_h	0

f. Standar kelelahan (*fatigue criterion*)

Dalam pengerjaan analisis *fatigue* pada *free span*, DNV-RP-F105 telah menetapkan standar kelelahan (*fatigue criterion*) yaitu :

$$\eta \cdot T_{life} \geq T_{exposure} \quad (2.39)$$

Keterangan :

η : rasio *fatigue damage* yang diperbolehkan, dimana berdasarkan DNV-RP-F105 :

- untuk kondisi *low*, bernilai = 1.0
- untuk kondisi *normal*, bernilai = 0.5
- untuk kondisi *high*, bernilai = 0.25

T_{life} : kapasitas desain umur *fatigue* (tahun)

$T_{exposure}$: masa kerja beban (tahun)

Selain itu, terdapat beberapa parameter-parameter tambahan dalam mencari umur kelelahan dari *free span* yang sedang ditinjau. Adapun parameter-parameter tersebut adalah :

➤ Penentuan dampak kelelahan (*fatigue damage*)

Untuk mendapatkan nilai *fatigue damage* (D_{fat}), regulasi dari DNV-RP-F105 mengacu berdasarkan dalil akumulasi (*the accumulation law*) dari Palmgren-Miner yaitu :

$$D_{fat} = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (2.40)$$

Keterangan :

D_{fat} : akumulasi dari dampak kelelahan

n_i : total jumlah siklus tegangan yang berhubungan dengan (*mid-wall*) dari rentang tegangan S_i

N_i : jumlah siklus kegagalan pada rentang tegangan S_i

\sum : menandakan jumlah keseluruhan fluktuasi tegangan yang terjadi pada umur desain

➤ Penentuan umur kelelahan (*fatigue life*)

Sebelum menentukan umur kelelahan dari *free span* yang akan dianalisis, kita harus menentukan jumlah siklus kegagalan dalam rentang tegangan S_i . Adapun jumlah siklus kegagalan dalam rentang tegangan S_i didefinisikan dalam kurva S-N (*S-N curve*) adalah sebagai berikut:

$$N = \begin{cases} \bar{a}_1 \cdot S^{-m_1} ; & \text{dimana } S > S_{sw} \\ \bar{a}_2 \cdot S^{-m_2} ; & \text{dimana } S \leq S_{sw} \end{cases} \quad (2.41)$$

$$(2.42)$$

Keterangan :

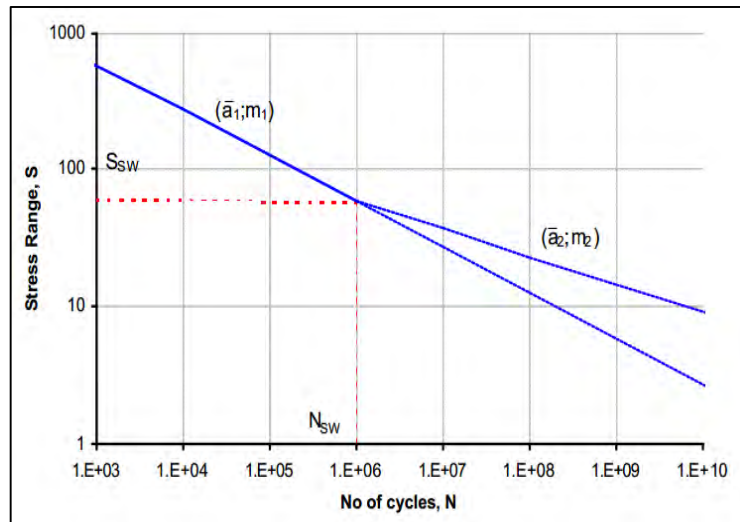
m_1, m_2 : *fatigue exponent (the inverse slope of the bi-linear S-N curve)*

\bar{a}_1, \bar{a}_2 : konstanta dari karakteristik kekuatan kelelahan

S_{sw} : tegangan pada perpotongan dari 2 kemiringan dalam kurva S-N yang bertipe 2 kemiringan (*two-slope S-N curve*) yang didefinisikan sebagai berikut.

$$S_{sw} = 10^{\left(\frac{\log \bar{a}_1 - \log N_{sw}}{m_1} \right)} \quad (2.43)$$

Dimana N_{sw} jumlah siklus dari yang berubah dalam perpotongan kemiringan (*slope*) yang ada pada grafik dibawah ini.

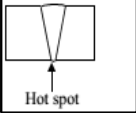
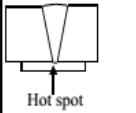
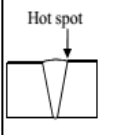
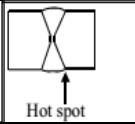


Gambar 2.12 Kurva S-N untuk Tipe 2 Kemiringan (*Two-Slope*) (DNV-RP-F105, 2002)

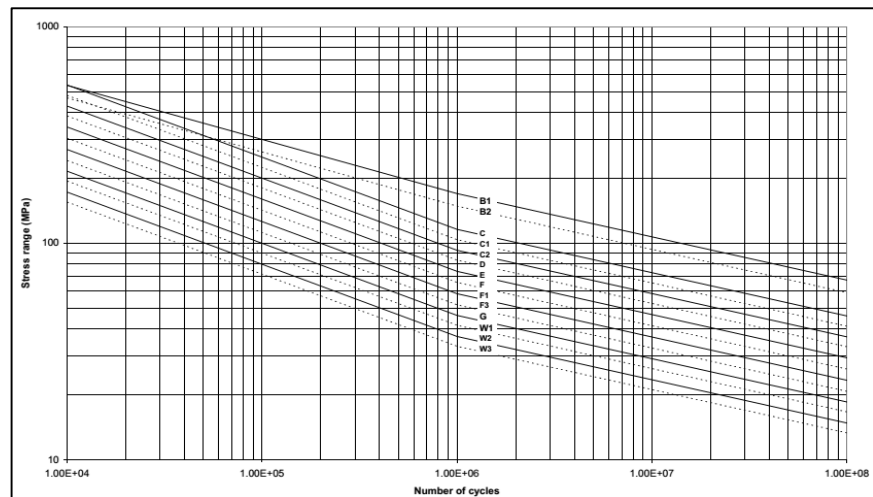
Perlu diketahui, dalam penentuan nilai *fatigue exponent* (m_1, m_2) dan konstanta karakteristik kekuatan kelelahan, DNV-RP-C203 mengenai “*Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structure*” memberikan banyak penjelasan secara detail mengenai kurva S-N secara umum mengenai struktur baja laut dan penentuan untuk nilai dari keduanya. Namun untuk keperluan analisis pipa, kode tersebut

memasukkan beberapa kelas berdasarkan cara pengelasannya, seperti tabel di bawah ini :

Tabel 2.8 Klasifikasi Pengelasan dalam *Pipelines* (DNV-RP-C203)

Penjelasan		Persyaratan Toleransi	Kurva S-N	log a	m
Model Pengelasan	Geometri dan <i>Hot Spot</i>				
Satu sisi (dengan 1 titik <i>hot spot</i>)		$\delta \leq \min(0.15t, 3mm)$	F1	11.299	3
		$\delta > \min(0.15t, 3mm)$	F3	11.146	3
Satu sisi (dengan 2 titik <i>hot spot</i>)		$\delta \leq \min(0.15t, 2mm)$	F	11.455	3
		$\delta > \min(0.15t, 2mm)$	F1	11.299	3
Satu sisi		-	D	11.764	3
Dua sisi		-	D	11.764	3

Untuk kurva S-N dari tabel klasifikasi di atas menggunakan kurva S-N untuk kondisi di laut dengan proteksi katodik (*cathodic protection*) seperti kurva di bawah ini.



Gambar 2.13 Kurva S-N untuk Kondisi di Laut dengan Proteksi Katodik (*Cathodic Protection*) (DNV-RP-C203)

Sedangkan untuk mencari ukuran umur kelelahan, T_{life} , dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_{life} = \frac{1}{\sum \left(\frac{f_v \cdot S_i^m \cdot P_i}{\bar{a}} \right)} \quad (2.44)$$

Keterangan :

P_i : kemungkinan kejadian untuk kondisi “ i ” dari *stress range*

g. Frekuensi natural

Suatu *free span* memiliki frekuensi natural sebagai respon dinamikanya terhadap beban lingkungan dan operasi yang diterima. Besar frekuensi natural *free span* dihitung berdasarkan persamaan berikut :

$$f_n = C_1 \sqrt{1 + CSF} \times \sqrt{\frac{E \times I}{M_E \times L_{eff}^4} \times \left(1 + \frac{S_{eff}}{P_E} + C_3 \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \right)} \quad (2.45)$$

Keterangan :

C_1 dan C_3 : koefisien kondisi batas, lihat tabel 2.9

CSF : *concrete stiffnes enhancement factor*

E : modulus elastisitas untuk pipa (N/m²)

I : momen inersia pipa (m⁴)

M_e : massa efektif (kg/m)

L_{eff} : panjang *span* efektif (m)

D : diameter terluar pipa (m)

S_{eff} : gaya aksial efektif (N/m)

P_E : beban *Euler* (N/m)

δ : defleksi statis (m)

h. Kondisi batas

Untuk melakukan analisis *free span*, kita diharuskan untuk menentukan kondisi peletakan dari *free span* yang kita tinjau. Dalam hal ini, DNV-RP-F105 telah memberikan 3 macam kondisi peletakan sesuai dengan teori pembebanan, yaitu kondisi *pinned-pinned*, *fixed-fixed*, dan *single span on seabed* atau juga dapat disebut *pinned-fixed*. Berikut ini adalah keterangan penggunaan dari 3 kondisi peletakan.

- *Pinned-pinned* : digunakan untuk *span* yang masing-masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus, tetapi masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.
- *Fixed-fixed* : digunakan untuk *span* yang masing-masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus dan berotasi terhadap sumbu pipa tersebut.
- *Pinned-fixed* : digunakan untuk *span* yang salah satu ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus serta rotasi terhadap sumbu pipanya, sedangkan ujung yang lain masih diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipanya.

Berikut ini adalah tabel dari konstanta kondisi batas untuk setiap kondisi peletakan.

Tabel 2.9 Konstanta Kondisi Batas (DNV-RP-F105, 2002)

	<i>Pinned-pinned</i>	<i>Fixed-fixed</i>	<i>Single Span on Seabed</i>
C_1	1.57	3.56	3.56
C_2	1	0.25	0.25
C_3	0.8	0.2	0.4
C_4	4.39	14.1	14.1
C_6	5/384	1/384	1/384

i. Gaya aksial efektif

Pada dasarnya, ketika sebuah pipa bawah laut memiliki suatu penampang tertentu, memiliki nilai momen inersia dan kekakuan, maka pipa bawah laut dapat dikategorikan sebagai balok secara umum. Akan tetapi, pada suatu *free span*, pipa mengalami regangan yang disebabkan oleh pemuaian material akibat temperatur *content*, dan juga tekanan *content* tersebut. Oleh karena itu, pipa bawah laut memiliki karakteristik yang unik dalam analisis mekanika teknik, sehingga tidak dapat disebut balok.

Sebuah *free span* akan mengalami regangan pada kedua ujungnya, sehingga disimpulkan ada gaya aksial yang bekerja padanya. Pada umumnya perpanjangan ini menjadi suatu lendutan vertikal. Gaya aksial efektif bukan merupakan gaya aksial yang bekerja pada dinding pipa. Untuk sebuah *free span*, maka gaya aksial efektif dapat dituliskan sebagai berikut :

$$S_{eff} = H_{eff} - \Delta p_i A_i (1 - 2\nu) - A_{pipa} E \Delta T \alpha_e \quad (2.46)$$

Keterangan :

- H_{eff} : *tension* dari *pipelay barge* pada fase instalasi (*pipe laying*) (N/m)
- Δp_i : perbedaan tegangan internal relatif terhadap fase instalasi ($P_i = 0$) (N/m)
- A_{pipa} : luas penampang melintang pipa baja (m²)
- A_i : luas penampang bagian dalam pipa (*internal cross section*) (m²)
- ΔT : perbedaan temperatur relatif terhadap fase instalasi (°C)
- α_s : koefisien ekspansi temperatur, diabaikan karena temperatur dianggap konstan

j. *Concrete stiffness enhancement factor (CSF)*

Pada pipa bawah laut, diberikan lapisan pelindung korosi (*corrosion coating guard*) yang terdiri dari *High Density Polyethylene* (HDPE). Adanya lapisan beton merupakan armor terluar yang berfungsi sebagai pemberat untuk menjaga stabilitas pipa. Perbedaan kekakuan antara beton, HDPE dan pipa baja dan kombinasi diantaranya, merupakan faktor yang mempengaruhi frekuensi natural dari suatu *free span* pipa. Dalam perhitungan sederhana, dilakukan analisis mekanika teknik untuk penampang komposit. Sehingga, CSF ini menunjukkan kekakuan lapisan *concrete relative* terhadap kekakuan pipa baja. Untuk Tugas Akhir ini, perhitungan kombinasi kekakuan antara pipa baja dengan lapisan beton dan HDPE (CSF) ditentukan oleh persamaan berikut ini:

$$CSF = k_c \left(\frac{EI_{conc}}{EI_{steel}} \right)^{0,75} \quad (2.47)$$

Keterangan :

CSF : faktor rasio kekakuan beton dan kekakuan pipa baja (*bare pipe*)

k_c : konstanta empiris yang meliputi deformasi/slip pada lapisan anti korosi dan keretakan pada lapisan *concrete* (=0,33 untuk aspal dan 0,25 untuk PP/PE *coating*)

I_{conc} : momen inersia lapisan beton (m⁴)

I_{steel} : momen inersia pipa baja (m⁴)

E_{conc} : modulus elastisitas lapisan beton (N/m²)

E_{steel} : modulus elastisitas pipa baja (N/m²)

k. *Beban euler*

Beban tekuk kritis adalah beban terkecil dimana keseimbangan netral masih dapat terjadi. Besarnya beban *euler* dipengaruhi oleh berbagai faktor antara lain tipe tumpuan, kekakuan baja, CSF , dan panjang *span* efektif. Beban tekuk kritis diperoleh dari perhitungan rumus pada persamaan berikut ini :

$$P_E = (1 + CSF) \times C_2 \times \pi^2 \times \frac{EI}{L_{eff}^2} \quad (2.48)$$

Keterangan :

C_2 : koefisien kondisi batas, lihat tabel 2.9

CSF : *concrete stiffness enhancement factor*

E : *modulus elastisitas* untuk pipa (N/m²)

I : momen inersia pipa (m⁴)

L_{eff} : panjang *span* efektif (m)

l. Defleksi statis

Defleksi statis adalah lendutan yang terjadi pada suatu *freespan* pipa akibat beban statik yang bekerja pada pipa, yaitu berat sendiri (*self weight*) dari pipa untuk arah *cross-flow* dan gaya hidrodinamik total

untuk arah *in-line*. Defleksi statis dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\delta = C_6 \frac{q \times L_{eff}^4}{EI(1 + CSF)} \frac{1}{\left(1 + \frac{S_{eff}}{P_{cr}}\right)} \quad (2.49)$$

Keterangan :

- δ : defleksi statis (m)
 C_6 : koefisien kondisi batas, lihat tabel 2.9
 q : beban berupa berat terendam pipa atau gaya hidrodinamis (N/m)

m. Kekuatan tanah relevan

Kekuatan tanah relevan dipengaruhi oleh tipe tanah, diameter pipa, dan perbandingan densitas antara pipa dan air laut. Kekakuan tanah relevan terdiri dari kekakuan dinamik arah lateral dan vertikal. Kekakuan dinamik ditentukan oleh persamaan sebagai berikut :

$$K_L = C_L \times \left(\frac{2}{3} \times M_{ratio} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D} \quad (2.50)$$

$$K_v = C_v \times \left(\frac{2}{3} \times M_{ratio} + \frac{1}{3} \right) \sqrt{D} \quad (2.51)$$

Keterangan :

- K_L : kekakuan dinamik arah lateral (N/m²)
 K_v : kekakuan dinamik arah vertikal (N/m²)
 C_L : faktor kekakuan dinamik arah lateral
 M_{ratio} : rasio perbandingan massa struktur dengan massa *bouy*
 D : diameter terluar pipa (m)
 C_v : faktor kekakuan dinamik arah vertikal

Faktor kekakuan dinamik baik arah lateral maupun arah vertikal ditentukan dari tipe tanah dan keadaan tanah. Tipe tanah tersebut dibagi menjadi dua, yaitu pasir dan lumpur. Faktor kekakuan dinamik untuk tipe tanah berupa pasir diberikan pada tabel berikut ini :

Tabel 2.10 Koefisien Kekauan Dinamik Tanah (DNV-RP-F105, 2002)

Type		C_v	C_L
		$kN/m^{5/2}$	$kN/m^{5/2}$
Sand type	<i>Loose</i>	10500	9000
	<i>Medium</i>	14500	12500
	<i>Dense</i>	21000	18000
Clay type	<i>Very soft</i>	600	500
	<i>Soft</i>	1400	1200
	<i>Firm</i>	3000	2600
	<i>Stiff</i>	4500	3900
	<i>Very stiff</i>	11000	9500
	<i>Hard</i>	12000	10500

n. Panjang *span* efektif

Panjang *span* efektif merupakan panjang ideal *span*, yang mengasumsikan bahwa panjang *free span* tersebut pada kondisi *fixed to fixed constraint*. Pada panjang *span* efektif ini, dianggap memiliki frekuensi natural yang sama dengan *free span* yang sebenarnya (aktual) yang ditopang oleh *seabed*.

Besar rasio antara panjang *span* efektif (L_{eff}) dan panjang *span* aktual (L) dituliskan sebagai L_{eff}/L . Nilai rasio ini berkurang seiring bertambah besarnya rasio L/D_{st} dan kekakuan tanah *seabed*. Besar L_{eff}/L diberikan oleh persamaan berikut :

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4,73}{-0,066\beta^2 + 1,02\beta + 0,63} & \text{untuk } \beta \geq 2,7 \end{cases} \quad (2.52)$$

$$\frac{L_{eff}}{L} = \begin{cases} \frac{4,73}{0,036\beta^2 + 0,61\beta + 1} & \text{untuk } \beta < 2,7 \end{cases} \quad (2.53)$$

$$\beta = \log_{10} \left(\frac{K \times L^4}{(1 + CSF) \times EI} \right) \quad (2.54)$$

Keterangan :

L : panjang *span* aktual (m)

K : kekakuan tanah relevan, baik secara vertikal (K_v) maupun horizontal (K_H) (N/m^2)

L_{eff} : panjang *span* efektif (m)

2.2.8 Respon Model

Pemodelan respon amplitudo adalah model empirik yang berguna untuk mencari besar amplitudo respon VIV *steady state maximum* sebagai fungsi dasar hidrodinamika dan parameter struktur. Pemodelan respon ini dilakukan untuk kondisi sebagai berikut :

- *In-line* VIV untuk arus *steady* dan kondisi arus dominan
- *Cross-flow* VIV yang disebabkan gerakan arah *in-line*
- *Cross-flow* VIV untuk arus *steady* dan kombinasi gelombang dan arus.

Dalam respon model ini, analisis *in-line* dan *cross-flow* VIV dilakukan terpisah. Kontribusi kerusakan yang dari *first & second in-line instability region* dalam kondisi arus dominan dianalisis secara implisit dalam model *in-line*. Respon amplitudo bergantung pada beberapa parameter hidrodinamika dan data lingkungan, yaitu :

- *Reduced velocity*, V_R
- Bilangan *Keulegan-Carpenter*, KC

$$KC = \frac{U_w}{f_w \times D}$$

dimana, f_w merupakan frekuensi gelombang (rad/s)

- Rasio kecepatan aliran arus, α
- Intensitas turbulensi, I_c
- Sudut aliran relatif terhadap pipa, θ_{rel}
- Parameter stabilitas, K_s

1. *In-line response model*

Respon arah *in-line* dari suatu *free span* pipa pada kondisi arus dominan berkaitan dengan kondisi *vortex shedding* simetris. Amplitudo respon terutama bergantung pada *reduced velocity* (V_R), parameter stabilitas K_s , dan sudut datang arah arus relatif terhadap pipa θ_{rel} . Analisis *in-line* VIV *response* model ini dilakukan untuk kedua zona *instability*, yaitu pada daerah 1 ($1.0 < V_R < 2.5$) dan daerah 2 ($2.5 < V_R < 4.5$). jika data-data

detail untuk perhitungan amplitudo tegangan *in-line* VIV tidak ada, maka diambil penyederhanaan perhitungan besar amplitudo *in-line* VIV adalah 50% dari besar amplitudo *cross-flow* VIV.

Besar range tegangan dari *in-line* VIV adalah sebagai berikut :

$$S_{IL} = 2 A_{IL} \left(\frac{A_Y}{D} \right) \psi_{\alpha,IL} \gamma_{IL} \quad (2.55)$$

Keterangan :

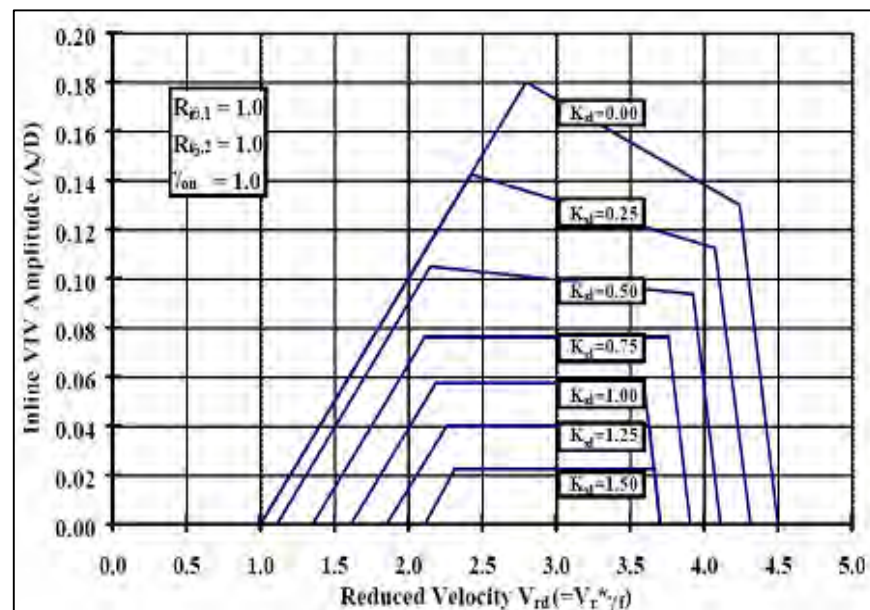
S_{IL} : *stress range* pada arah *in-line* VIV (N/m²)

A_{IL} : *unit amplitude stress*, tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *in-line* (N/m²)

$\psi_{\alpha,IL}$: faktor koreksi untuk rasio kecepatan aliran arus

γ_{IL} : faktor keamanan untuk *in-line* VIV

A_Y/D : amplitudo maksimum dari vibrasi pada arah *in-line* VIV



Gambar 2.14 Respon Amplitudo *In-Line* VIV vs V_R vs K_{sd} (DNV-RP-F105, 2002)

Besar standar deviasi dari amplitudo vibrasi arah *in-line* adalah (A_Y/D) $\sqrt{2}$. Dalam penentuan nilai A_Y/D , maka besaran *reduced velocity* dan parameter stabilitas harus dimodifikasi sebagai berikut:

$$V_{Rd} = V_R \cdot \gamma_f \quad (2.56)$$

$$K_{sd} = K_S / \gamma_k \quad (2.57)$$

Faktor reduksi $R_{I\theta,I}$ diasumsikan bernilai 1, dimana sudut datang arah arus dianggap tegak lurus pipa.

Sedangkan besarnya nilai $\psi_{\alpha,IL}$ yang merupakan fungsi reduksi *in-line* VIV akibat kondisi gelombang dominan didapatkan dari persamaan berikut :

$$\psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5) & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.5 \\ 0.3 & \text{untuk } \alpha > 0.5 \\ 1.0 & \end{cases} \quad (2.58)$$

$$\psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5) & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.5 \\ 0.3 & \text{untuk } \alpha > 0.5 \\ 1.0 & \end{cases} \quad (2.59)$$

$$\psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0.0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ (\alpha - 0.5) & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.5 \\ 0.3 & \text{untuk } \alpha > 0.5 \\ 1.0 & \end{cases} \quad (2.60)$$

Maka dari itu, pada kasus dimana $\alpha < 0.5$, maka *in-line* VIV diabaikan.

2. *In-line reduced velocity*

Nilai *in-line onset reduced velocity* adalah sebagai berikut :

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{ untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{ untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} & ; K_{sd} > 1.6 \end{cases} \quad (2.61)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{ untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{ untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} & ; K_{sd} > 1.6 \end{cases} \quad (2.62)$$

$$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{ untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{ untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} & ; K_{sd} > 1.6 \end{cases} \quad (2.63)$$

Dimana, $V_{R,onset}^{IL}$:

$K_{sd} = K_S / \gamma_k$; γ_k : faktor keamanan parameter stabilitas

$K_s = \frac{4 \pi m_e \zeta_T}{\rho D^2}$; ζ_T : total rasio modal *damping*, yang terdiri dari :

- Redaman struktural (ζ_{str}), merupakan *damping*/redaman yang terjadi akibat adanya gaya gesek internal dari material pipa. Besarnya bergantung pada level regangan dan defleksi yang terjadi. Untuk penyederhanaan diambil sebesar 0.005. Jika terdapat lapisan beton, diambil nilai antara 0.01 - 0.02.

- Redaman tanah *seabed* (ζ_{soil}), merupakan *damping*/redaman yang terjadi akibat gaya gesek antara permukaan luar pipa dengan tanah *seabed*. Untuk screening *fatigue*, diambil sebesar 0.01.
- Redaman hidrodinamik (ζ_h), merupakan *damping*/redaman yang terjadi akibat gaya hidrodinamik yang menimbulkan gaya gesek pada permukaan pipa. Untuk VIV yang terjadi pada *region lock-in*, maka nilainya dianggap nol (0).

Dari persamaan *in-line reduced velocity* untuk *region* lainnya dalam grafik pada gambar 2.20 adalah sebagai berikut :

$$V_{R,1}^{IL} = 10 \left(\frac{A_{y,1}}{D} \right) + V_{R,onset}^{IL} \quad (2.64)$$

$$V_{R,2}^{IL} = V_{R,1}^{IL} - 2 \left(\frac{A_{y,2}}{D} \right) \quad (2.65)$$

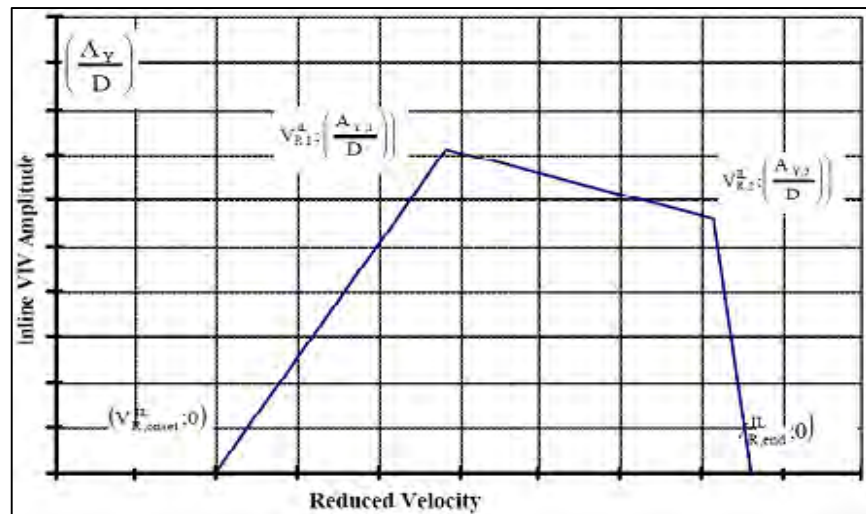
$$V_{R,end}^{IL} = \begin{cases} 4.5 - 0.8 K_{sd} ; \text{untuk } K_{sd} < 1.0 \\ 3.7 ; \text{untuk } K_{sd} \geq 1.0 \end{cases} \quad (2.66)$$

$$(2.67)$$

$$\left(\frac{A_{y,1}}{D} \right) = \max \left[0.18 \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.2} \right) R_{I\theta,1} ; \left(\frac{A_{y,2}}{D} \right) \right] \quad (2.68)$$

$$\left(\frac{A_{y,2}}{D} \right) = 0.13 \left(1 - \frac{K_{sd}}{1.8} \right) R_{I\theta,2} \quad (2.69)$$

Seluruh hasil perhitungan dari persamaan-persamaan diatas akan membentuk grafik seperti gambar 2.15 berikut ini :



Gambar 2.15 Ilustrasi Pembentukan Grafik Respon Model *In-Line* VIV (DNV-RP-F105, 2006)

Besaran $R_{I\theta}$ merupakan fungsi reduksi untuk memperhitungkan efek intensitas turbulensi yang terjadi, yang ditentukan berdasarkan arah datang aliran arus/gelombang menuju pipa (dalam radian). $R_{I\theta}$ ditentukan untuk tiap daerah *instability*, sebagai berikut :

$$R_{I\theta,3} = 1 - \pi^2 \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{rel}\sqrt{2} \right) (I_c - 0.03) \quad (2.70)$$

$$R_{I\theta,4} = 1.0 - \left(\frac{I_c - 0.03}{0.17} \right) \quad (2.71)$$

Besar $R_{I\theta,3}$ dan $R_{I\theta,2}$ berada diantara 0.0 dan 1.0 ($0.0 \leq (R_{I\theta,3} ; R_{I\theta,2}) \leq 1.0$).

3. *Cross-flow response model*

Vibrasi *free span* pipa pada arah *cross-flow* dipengaruhi oleh beberapa parameter yang juga turut mempengaruhi vibrasi arah *in-line*. Parameter lainnya yang turut mempengaruhi adalah *rasio gap seabed* (e/D), bilangan Strouhal (S_t), dan tingkat kekasaran pipa (k/D).

Pada situasi aliran dengan arus yang dominan, maka permulaan (*onset*) dari amplitudo signifikan *cross-flow* VIV terjadi ketika besar V_R bernilai $3.0 < V_R < 5.0$. Sedangkan nilai vibrasi maksimum (amplitudo) terjadi pada $5.0 < V_R < 7.0$.

Untuk pipa dengan nilai *specific mass* (ρ_s/ρ) yang kecil, dan situasi gelombang dominan atau *skenario free span* dengan gap dengan *seabed* kecil, maka vibrasi *cross-flow* mulai terjadi pada $2.0 < V_R < 3.0$.

Besar *range* tegangan yang diakibatkan *cross-flow* VIV akibat kombinasi arus dan gelombang dituliskan oleh persamaan berikut ini :

$$S_{CF} = 2 A_{CF} \left(\frac{A_z}{D} \right) R_k \gamma_s \quad (2.72)$$

Keterangan :

S_{CF} : *stress range* pada arah *cross-flow* VIV (N/m²)

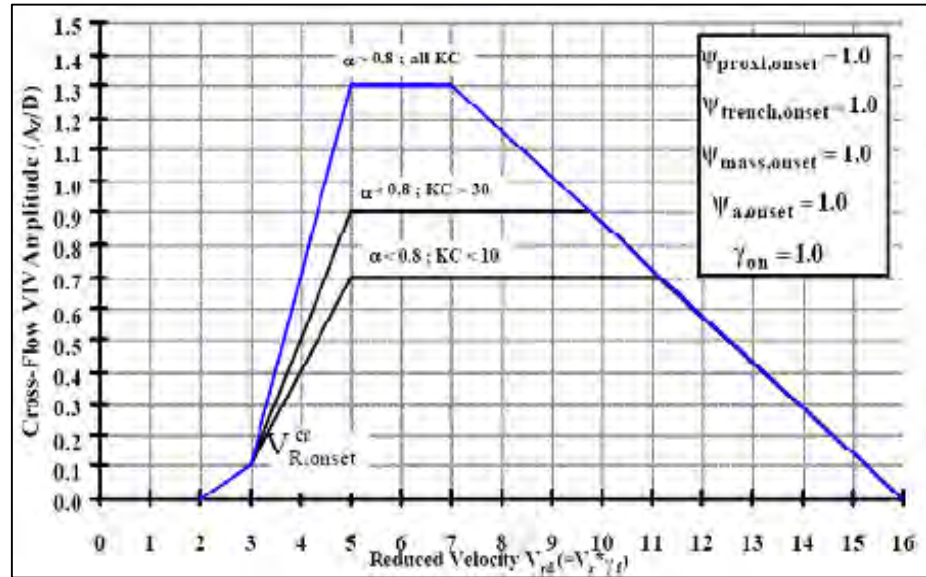
A_{CF} : *unit amplitude stress*, tegangan yang dilakukan unit diameter dari mode bentuk defleksi *cross-flow* (N/m²)

R_k : faktor reduksi amplitudo akibat adanya *damping/redaman*

γ_s : faktor keamanan untuk *range* tegangan

A_z/D : amplitudo vibrasi pada arah *cross-flow* VIV

Besar amplitudo maksimum dari vibrasi arah *cross-flow* yang didefinisikan sebagai A_z/D untuk kondisi kombinasi arus dan gelombang. Besar standar deviasi dari amplitudo vibrasi arah *cross-flow* adalah $(A_z/D) \sqrt{2}$.



Gambar 2.16 Respon Amplitudo *Cross-Flow* VIV vs V_{Rd} vs K_{Sd}
(DNV-RP-F105, 2002)

Parameter R_K merupakan faktor reduksi akibat adanya efek *damping*. Karakteristik vibrasi arah *cross-flow* berkurang dengan adanya *damping* ini.

$$R_k = \begin{cases} 1 - 0.15 K_{Sd} ; \text{untuk } K_{Sd} \leq 4 & (2.73) \\ 3.2 K_{Sd} & ; \text{untuk } K_{Sd} > 4 \end{cases} \quad (2.74)$$

4. *Cross-flow reduced velocity*

Untuk menentukan nilai dari *cross-flow onset velocity*, hal ini sangat bergantung pada kedekatan dengan *seabed* geometri *trench*, rasio aliran arus, dan faktor massa spesifik pipa. Secara umum dirumuskan sebagai berikut :

$$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \times \psi_{\text{proxi,onset}} \times \psi_{\text{mass,onset}} \times \psi_{\text{current,onset}}}{\gamma_{\text{on,CF}}} \quad (2.75)$$

dimana :

$$\psi_{\text{proxi,onset}} = \begin{cases} \frac{1}{4} \left(3 + 1,25 \frac{e}{D} \right) & \text{untuk } e/D < 0,8 \\ 1 & \text{untuk } e/D \geq 0,8 \end{cases} \quad (2.76)$$

$$(2.77)$$

untuk nilai dari faktor koreksi antara kedekatan jarak antara pipa dan *seabed*,

$$\psi_{\text{mass,onset}} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \times M_{\text{ratio}} & ; \text{ untuk } M_{\text{ratio}} < 1.5 \\ 1 & ; \text{ untuk } M_{\text{ratio}} \geq 1.5 \end{cases} \quad (2.78)$$

$$(2.79)$$

untuk nilai dari faktor koreksi massa,

$$\psi_{\alpha,onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3} & ; \text{ untuk } \alpha < 1.5 \\ 1.167 & ; \text{ untuk } \alpha \geq 1.5 \end{cases} \quad (2.80)$$

$$(2.81)$$

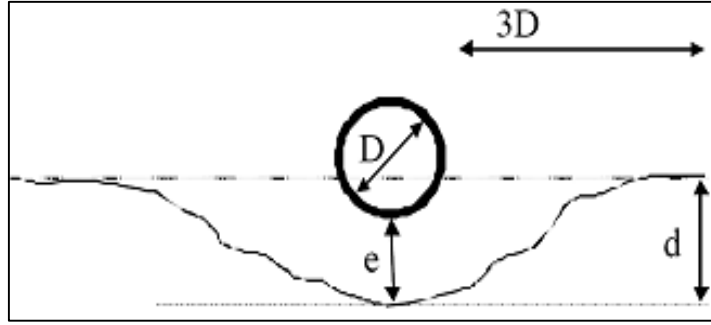
untuk nilai dari faktor koreksi dari kecepatan arus,

$$\psi_{\text{trench,onset}} = 1 + 0.5 \cdot \frac{\Delta}{D} \quad (2.82)$$

untuk nilai dari faktor koreksi akibat keberadaan pipa pada suatu parit/*trench*. Besaran nilai dari Δ/D merupakan kedalaman relatif *trench*, dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\Delta}{D} = \frac{1,25 d - e}{D} ; \text{ dimana } 0 \leq \frac{\Delta}{D} \leq 1 \quad (2.83)$$

Kedalaman *trench* (d) diambil dari jarak sejauh 3 kali diameter terluar pipa, dihitung dari tengah penampang pipa. Nilai Δ/D diambil sebesar nol (0) jika pipa terletak pada *seabed* yang rata/*flat*, atau pada jarak $D/4$ diatas *seabed*. Gambar 2.17 menunjukkan sketsa faktor koreksi *trench*.



Gambar 2.17 Definisi Parameter untuk Penentuan Faktor Koreksi
Trench (DNV-RP-F105, 2002)

Dan persamaan *cross-flow reduced velocity* untuk *region* lainnya dalam grafik pada gambar 2.17 adalah sebagai berikut.

$$V_{R,1}^{CF} = 5 \quad (2.84)$$

$$V_{R,2}^{CF} = V_{R,1}^{CF} - \left(\frac{9}{1.3} \right) \left(\frac{A_{z,1}}{D} \right) \quad (2.85)$$

$$V_{R,end}^{LL} = 16 \quad (2.86)$$

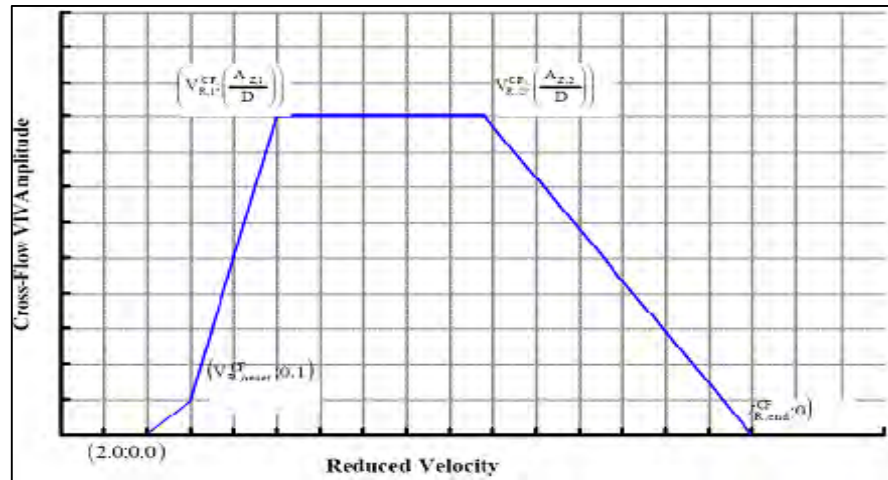
$$\left(\frac{A_{z,1}}{D} \right) = \left(\frac{A_{z,2}}{D} \right) \quad (2.87)$$

$$= \begin{cases} 1.30 & \alpha > 0.8 ; \text{semua } KC \\ 0.7 & \alpha > 0.8 ; \text{semua } KC \end{cases} \quad (2.88)$$

$$= \begin{cases} 0.7 + 0.01 + (KC - 10) & \alpha \leq 0.8 ; \text{untuk } 10 \leq KC \leq 30 \\ 0.9 & \alpha \leq 0.8 ; \text{untuk } KC \geq 30 \end{cases} \quad (2.89)$$

$$= \begin{cases} 0.7 + 0.01 + (KC - 10) & \alpha \leq 0.8 ; \text{untuk } KC \geq 30 \\ 0.9 & \alpha \leq 0.8 ; \text{untuk } KC \geq 30 \end{cases} \quad (2.90)$$

Seluruh hasil perhitungan dari persamaan-persamaan diatas akan membentuk grafik dengan *region* masing-masing ditunjukkan oleh gambar 2.18 berikut ini.



Gambar 2.18 Ilustrasi Pembentukan Grafik Respon Model *Cross-flow*
VIV (DNV-RP-F105, 2002)

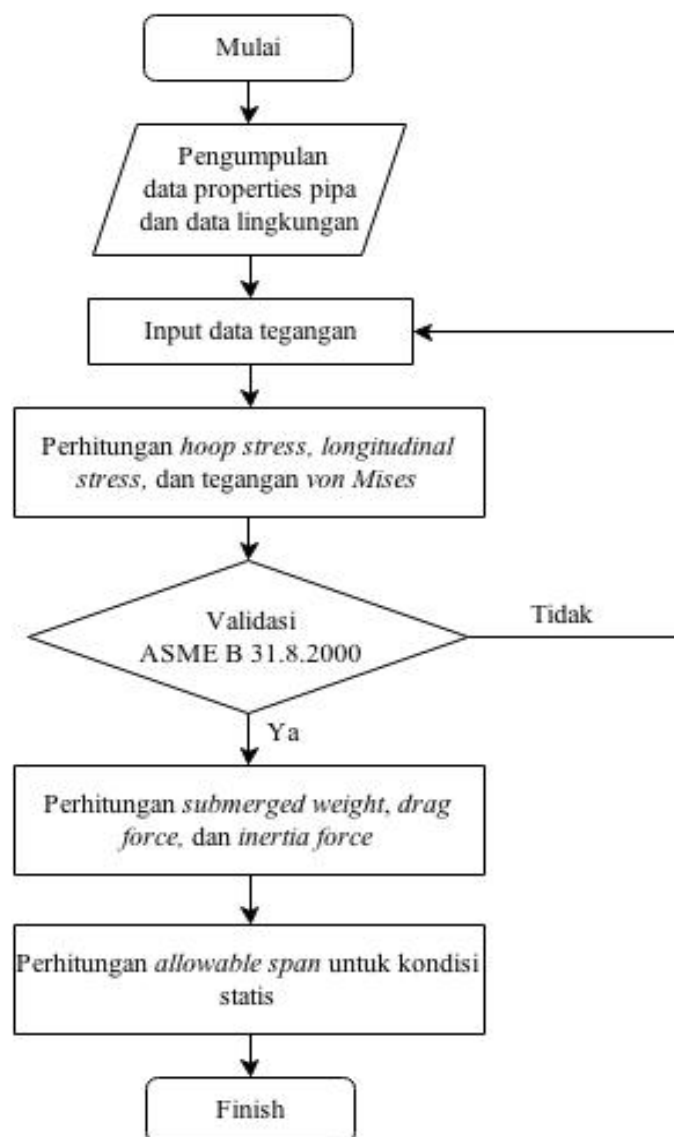
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

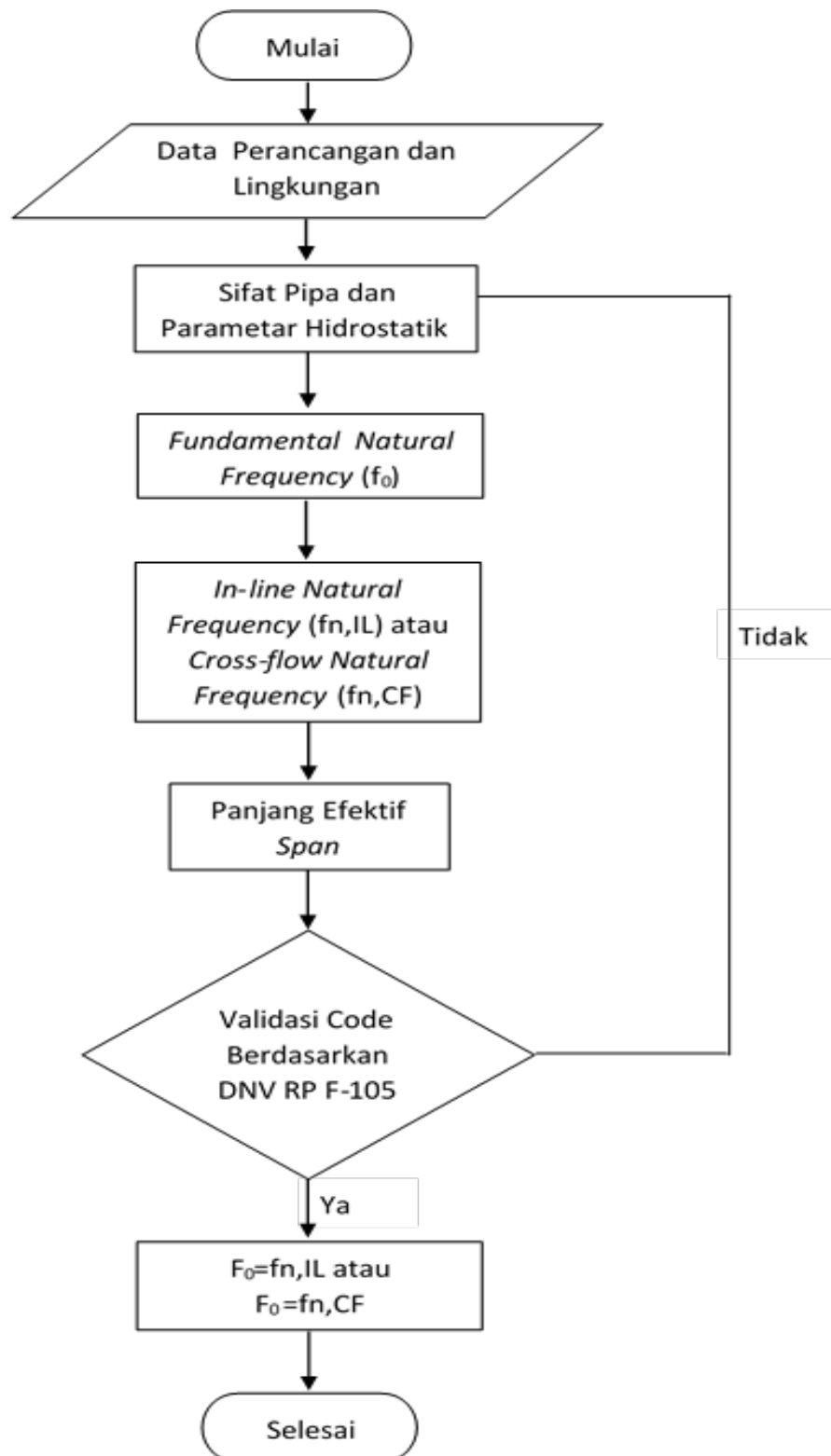
3.1.1 Metodologi Penelitian untuk Analisis Statis *Free Span* dan Tegangan *Pipelines*

Adapun metodologi analisis statis *pipelines* dan *free span* dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut :



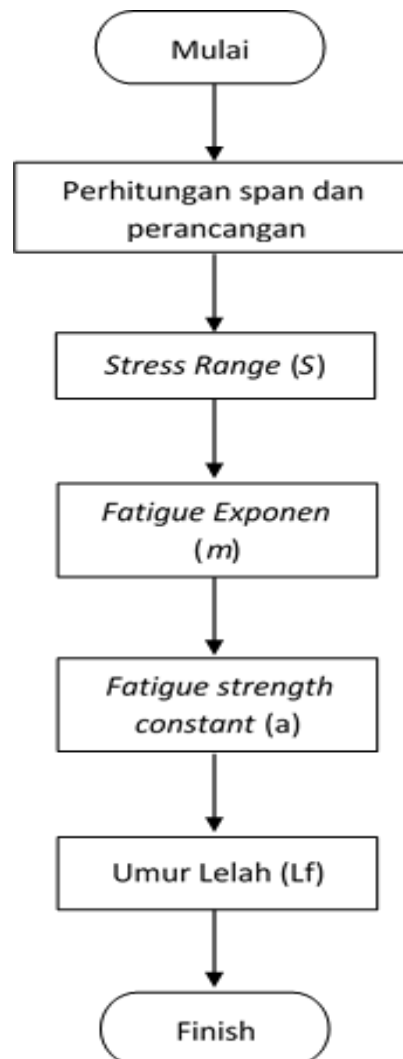
Gambar 3.1 Diagram Alir untuk Analisis Tegangan *Pipelines* dan Analisis Statis *Free Span*

3.1.2 Metodologi Penelitian untuk Analisis *Free Span* Dinamis



Gambar 3.2 Diagram Alir untuk Analisis Dinamis pada *Free Span*

3.1.3 Metodologi Penelitian untuk Analisis Kelelahan pada *Free Span*



Gambar 3.3 Diagram Alir untuk Analisis Kelelahan *Free Span*

3.2 Prosedur Penelitian

3.2.1 Prosedur Penelitian Untuk Analisis Statis *Free Span* dan Tegangan *Pipelines*

Adapun prosedur penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data

Data-data yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini adalah data pipa yang meliputi desain pipa dan data lingkungan yang meliputi arus, gelombang dan tanah yang meliputi parameter tanah dan koefisiennya sesuai dengan lokasi *crossing*.

2. Perhitungan Tegangan Pipa

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada daerah *crossing* pipa dan hanya dilakukan dalam kondisi operasi saja. Adapun perhitungan yang dilakukan adalah perhitungan *hoop stress*, *longitudinal stress*, dan tegangan ekuivalen (*von Mises*). Setelah mendapatkan nilai dari tegangan ekuivalen, nantinya akan divalidasi berdasarkan *code* ASME B 3.18.2000 tentang *Gas Transmission and Distributing Piping System*.

3. Analisis *Free Span* Statis

Setelah mendapatkan tegangan pipa yang diijinkan, analisis ini dilakukan untuk mengetahui tegangan pada *free span* yang ditopang oleh *support* pada lokasi *crossing*. Nantinya hasil perhitungan ini digunakan untuk mencari panjang *allowable* dari *span* yang paling efektif. Namun, perhitungan ini juga dilakukan dalam kondisi operasi. Adapun perhitungan yang mencakup adalah perhitungan *submerged weight*, *drag force*, dan *inertia force*.

4. Perhitungan Panjang *Allowable Span*

Setelah mendapatkan tegangan tiap *free span*, dilakukan perhitungan panjang *allowable span*.

3.2.2 Prosedur Penelitian untuk Analisis Dinamis *Free Span*

Adapun prosedur penelitian dalam melakukan analisis dinamis *free span* adalah sebagai berikut :

1. Melakukan Pengumpulan dan Pengolahan Data

Langkah pertama yang dilakukan dalam analisis ini adalah mengumpulkan data-data yang berhubungan dalam perhitungan analisis ini, seperti data karakteristik pipa dan data lingkungan seperti data tanah, gelombang, arus, dan sebagainya, termasuk panjang *span* yang didapatkan secara statik pada analisis sebelumnya. Setelah itu, dilakukan pengolahan data lingkungan terkhusus pada pengolahan data gelombang dan arus untuk mendapatkan kecepatan dari kedua beban tersebut. Dan untuk data gelombang, terlebih dahulu harus ditentukan

teori gelombang apakah yang sesuai menggunakan grafik dari *region of validity*. Sedangkan untuk data arus, perlu dilakukan perhitungan lebih lanjut untuk mendapatkan kecepatan arus pada *inner zone* untuk mendapatkan kecepatan partikel aliran dari arus.

Setelah mendapatkan keduanya, kemudian dilanjutkan dengan menentukan beberapa klasifikasi yang telah ditetapkan oleh DNV-RP-F105, seperti penentuan klasifikasi morfologi *seabed*, klasifikasi respon baik struktur maupun aliran. Terakhir, melakukan perhitungan yang berhubungan dengan karakteristik pipa, seperti perhitungan luasan, massa, berat, momen dari *free span* yang ditinjau. Selain itu, penentuan *CSF (concrete stiffness factor)* juga masuk dalam langkah ini.

2. Menentukan *Boundary Condition* (Kondisi Batas)

Langkah selanjutnya adalah menentukan kondisi batas yang telah ditetapkan oleh DNV-RP-F105 yang diantaranya adalah *safety factor* (baik dari untuk kriteria *screening* maupun untuk kriteria *fatigue analysis*), kriteria respon pipa, koefisien kondisi ujung *span*, dan koefisien kekakuan dinamik tanah.

3. Menghitung Sifat dan Parameter Hidrostatik dari *Free Span*

Setelah mendapatkan data lingkungan seperti data gelombang dan arus, dilakukan perhitungan hidrostatik dari *free span*. Adapun perhitungan sifat hidrostatik yang diperlukan adalah *Renold Number (Re)*, *Keulegan-Carpenter Number (KC)*, rasio aliran (*flow ratio*), gaya geser (*drag force*), dan gaya angkat (*lift force*). Sedangkan untuk parameter hidrostatik dalam analisis ini adalah *total damping ratio*, *stability parameter*, *stability parameter factor*, dan faktor koreksi seperti *seabed correction factor*, *mass correction factor*, dan *current correction factor*.

4. Menghitung *Fundamental Natural Frequency*

Setelah sebelumnya telah didapatkan nilai dari sifat dan parameter hidrostatik dari *free span*, langkah berikutnya adalah menentukan *fundamental natural frequency* dari *free span*. Perhitungan ini dilakukan

dalam 2 kondisi yang kondisi *in-line* dan *crossflow*, serta bertujuan untuk melihat respon dinamis dari *free span* terhadap beban lingkungan dan operasi yang diterima. Namun sebelumnya, diperlukan beberapa parameter seperti gaya efektif aksial, beban kritis atau *euler load*, dan defleksi statik yang terjadi pada *free span*.

5. Melakukan Perhitungan Panjang *Span* Efektif

Pada tahapan terakhir ini, kita hanya melakukan perhitungan panjang efektif dari *span* untuk kondisi dinamis. Namun sebelum melakukan perhitungan ini, terlebih dahulu kita harus menghitung *dynamic soil stiffness* dan *relative soil stiffness parameter* yang dibutuhkan untuk mencari panjang efektif dari *span*, baik secara *in-line* maupun secara *cross-flow*. Nantinya, dari kedua kondisi tadi dilihat dan dibandingkan, kemudian yang nilainya yang paling kecil diantara keduanya dijadikan sebagai *allowable span* untuk kondisi dinamis.

6. Melakukan Validasi *Screening* untuk Kriteria dan Standar *Fatigue* Berdasarkan DNV-RP-F105

Validasi dari *screening* kriteria dan untuk analisis *fatigue* dilakukan setelah mendapatkan *fundamental natural frequency* dari *free span*, baik secara *in-line* dan *cross-flow* serta dilakukan untuk 2 kondisi tersebut. Selain itu, juga dilakukan *screening* untuk melihat apakah terjadi VIV pada 2 kondisi tersebut menggunakan *reduced velocity* dengan ketentuan yang sudah ditetapkan pada masing-masing kondisi. Karena kedua hal ini diperlukan sebagai pintu awal apakah *free span* tersebut membutuhkan analisis *fatigue* atau tidak.

3.2.3 Prosedur Penelitian untuk Analisis Kelelahan *Free Span*

Tahapan-tahapan perhitungan umur *fatigue* menggunakan DNV-RP-F105 adalah sebagai berikut.

1. Pengumpulan Data Perhitungan *Span* Dari Analisis *Free Span* Dinamis
Pada tahapan ini, kita melakukan pengumpulan data-data karakteristik maupun hasil perhitungan yang berasal dari analisis sebelumnya, seperti *fundamental natural frequency*, *current flow ratio*, *concrete stiffness*

factor, dan parameter stabilitas dalam perancangan yang diperlukan dalam analisis *fatigue*.

2. Melakukan Perhitungan Rentang Tegangan (*Stress Range*)

Langkah selanjutnya adalah melakukan beberapa penghitungan parameter awal untuk menghitung nilai dari rentang tegangan (*stress range*) seperti faktor reduksi dari turbulensi arah aliran, *unit stress amplitude*, faktor koreksi baik untuk *current flow ratio* maupun *damping*, dan amplitudo maksimum dari respon VIV. Khusus untuk mendapatkan nilai faktor reduksi, kita memerlukan grafik hubungan antara intensitas turbulensi dengan sudut aliran yang ada pada DNV-RP-F105 dan juga mencari berapa faktor reduksi untuk sudut 0^0 , 30^0 , 37.5^0 , 45^0 , dan 60^0 . Nantinya akan diambil nilai terbesar diantara 5 sudut tadi kemudian dimasukkan dalam ketentuan dalam mencari nilai dari faktor koreksi untuk *current flow ratio*. Sedangkan untuk faktor koreksi *damping*, hal ini didapatkan berdasarkan ketentuan yang didalamnya terdapat nilai faktor stabilitas parameter. Setelah mendapatkan keseluruhan parameter yang dibutuhkan, baru kita dapat menghitung nilai dari *stress range* dari *free span* yang kita tinjau.

3. Menentukan *Fatigue Exponent* dan *Fatigue Strength Constant*

Untuk menentukan nilai *fatigue exponent* dan *fatigue strength constant*, kita dapat menggunakan kurva S-N sebagai acuannya. Namun, dalam DNV-RP-F105, penjelasan mengenai kurva S-N dan penentuan 2 variabel tersebut sangat kurang, sehingga kita disarankan untuk menggunakan DNV-RP-C203 mengenai “*Fatigue Design Of Offshore Steel Structures*” yang lebih detail membahas masalah ini.

4. Melakukan Perhitungan Umur Kelelahan

Perlu diketahui bahwa tujuan dari analisis ini adalah untuk mendapatkan umur kelelahan (*fatigue life*) dari *free span* yang kita tinjau. Dan setelah mendapatkan nilai dari *fatigue exponent* dan *fatigue strength constant*, serta *stress range* dari pipa yang kita tinjau, kita dapat langsung

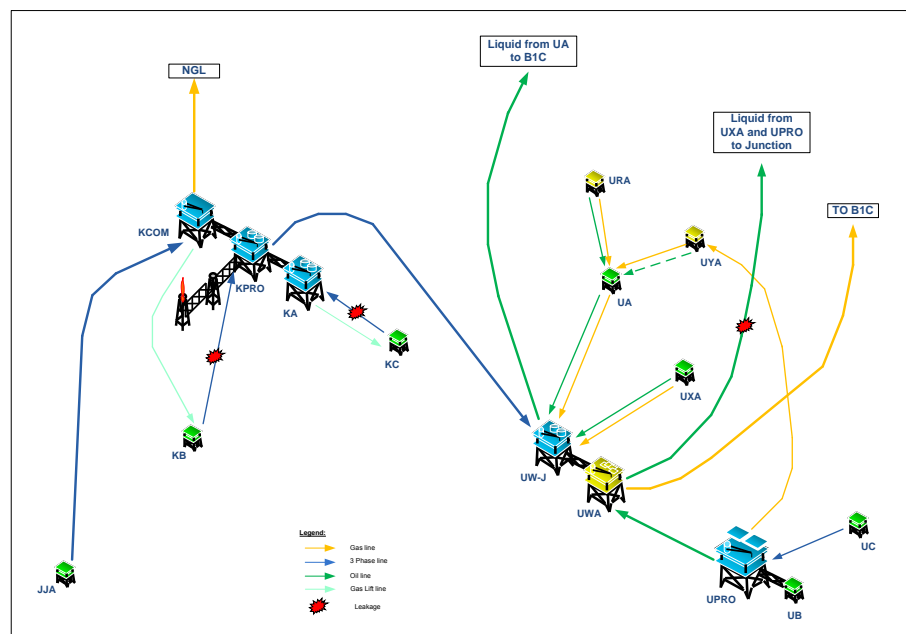
menentukan berapa lama *fatigue life* yang dimiliki oleh *free span* yang ditinjau. Namun disini, kita memerlukan data kemungkinan kejadian dari rentang tegangan yang terjadi, karena untuk kondisi ini, *stress* yang mengenai *span* itu berfluktuasi sehingga menimbulkan rentang dari tegangan minimum hingga tegangan maksimum. Dan hal ini bisa kita dapatkan ketika kita memiliki data persebaran kejadian dari data lingkungan, misalnya data arus yang dominan mengenai pipa.

BAB IV

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

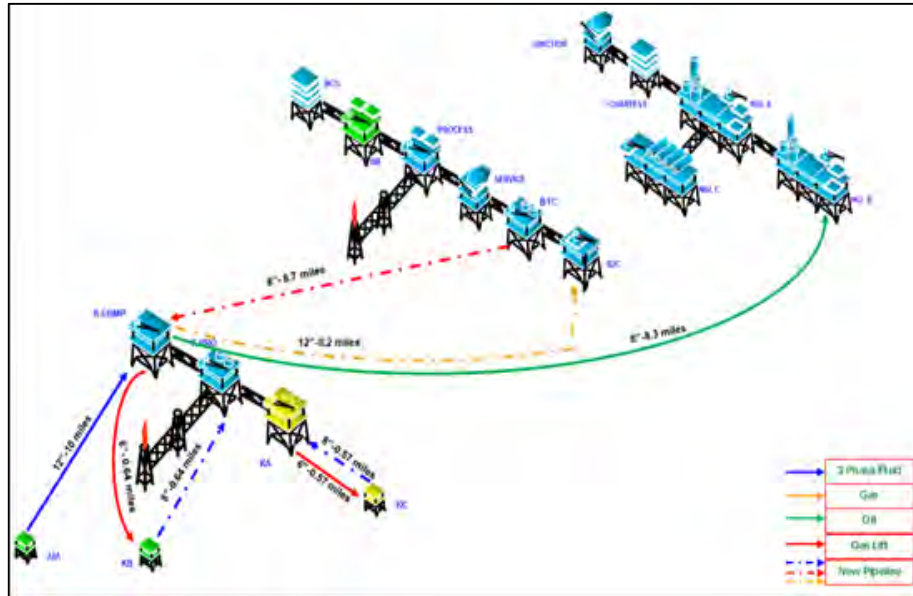
4.1 Umum

Studi Kasus yang digunakan dalam Tugas Akhir ini adalah proyek dari Kilo Field milik *Pertamina Hulu Energy Offshore North West Java* yang dikerjakan oleh *PT. Depriwangga Engineering*. KILO Area terdiri dari dua *platform* produksi yaitu *platform* KCOM dan KPRO serta empat *wellhead platform* yaitu KA, KB, KC, dan JJA. Berdasarkan dari laporan pada tahun 2012, *area* ini masih memiliki cadangan yang berpotensi untuk menambah produksinya. Saat ini hanya *platform* KA yang masih aktif menyalurkan hidrokarbon hasil pengeborannya ke *platform* produksi, karena terjadi kebocoran pada pipa yang menghubungkan *platform* KC-KA dan KB-KPRO sehingga *platform* KC dan KB ditutup. Berikut ini adalah *layout* dari KILO Area yang saat ini terdapat kebocoran pada *pipeline*.



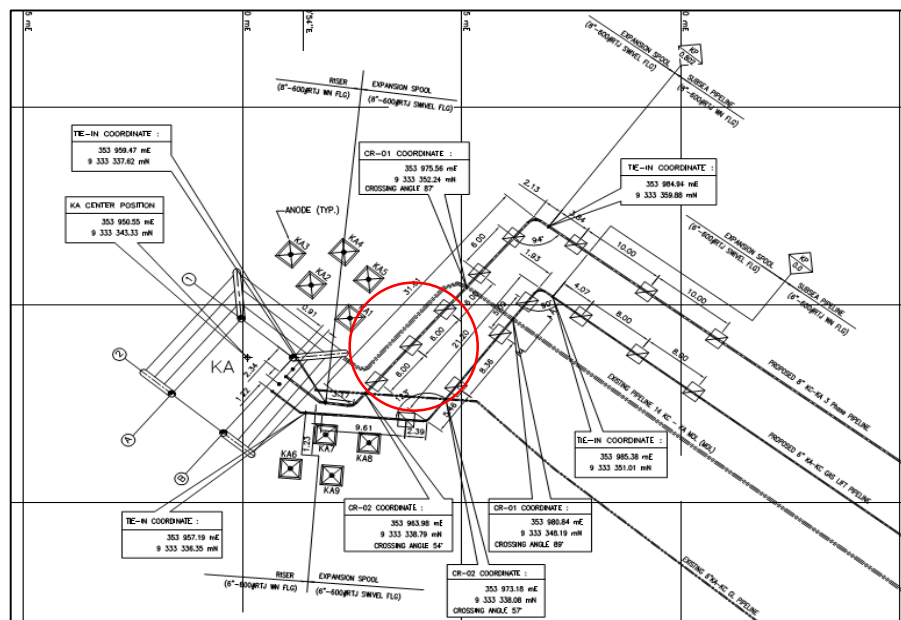
Gambar 4.1 *Kilo Field Layout* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Sedangkan berikut ini adalah *layout* rencana pengembangan yang akan dilakukan terhadap Kilo Area :



Gambar 4.2 Kilo Field Layout Development (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Namun perlu diketahui bahwa dalam Tugas Akhir, analisis yang dilakukan merupakan analisis pada *free span* tunggal dari *pipelines* KA ke KC yang bersilangan (*crossing*) dengan *existing pipelines* KC ke KA seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.3 Lokasi Crossing Pipelines antara Existing Pipelines KC-KA dengan Proposed Pipelines KA-KC (Pertamina Hulu Energy, 2012)

4.2 Pengumpulan Data

Berikut ini adalah table data awal terdapat di dalam desain basis.

Tabel 4.1 *Pipelines Reference* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Document Number	Pipeline OD	Origin	Termination	Service
	(mm)			
6" dia submarine pipeline	168	KA	KC	Gas Lift

Tabel 4.2 *Key Coordinates* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Platform Center Position	Location	
	Latitude	Longitude
KC Platform	6° 2' 06.23" S	107° 41' 08.93" E
KA Platform	6° 1' 47.43" S	107° 40' 47.11" E

Tabel 4.3 *Platform Water Depth* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Platform Center Position	Parameter
	Water Depth (m)
KC Platform	28.96
KA Platform	29.87

4.2.1 Crossing Detail

Detail dari *pipeline crossing* dapat ditunjukkan pada tabel dibawah ini :

Tabel 4.4 *Pipeline Crossing Details* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Description	Crossing No	Crossing Pipeline	Crossing Line Size (NPS)	Coordinates	
				Northing (m)	Easting (m)
6-inch Pipeline from KA to KC	CRS1	6" KA-KC Gas Lift Pipeline	6	353973,18	9333338,88
	CRS2	14" KC-KA MOL Pipeline	14	353980.88	9333348,19

4.2.2 Pipeline Design Parameter

Umur *pipelines* didesain selama 20 tahun.

4.2.3 Pressure and Temperature

Berikut ini adalah parameter tekanan dan suhu dari system *pipelines*.

Tabel 4.5 *Pipeline/Riser Process Data* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Parameters	Units	6" KA-KC Gas Lift Pipeline
Design Pressure	psig	950 (6.5 MPa)
Operating Pressure	psig	603 (4.16 MPa)
Hydrotest Pressure	psig	1330 (9.2 MPa)
Mechanical Design Temp. (Metal)	⁰ F	200 (93.3 ⁰ C)
Operating Temperature	⁰ F	85 (29.44 ⁰ C)
Density	kg/m ³	38.48
Service		Gas Lift

4.2.4 *Pipelines and Riser Mechanical Properties*

Berikut ini adalah tabel dari properti mekanis dari *pipeline* dan *riser*.

Tabel 4.6 *Pipeline/Riser Mechanical Properties* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Parameters		Units	6" KA-KC Gas Lift Pipeline
Outer Diameter		mm	168.3
Wall Thickness	Spool and Riser	mm	12.7
	Pipeline	mm	12.7
Material		-	API 5L Grade X52MO or X52QO PSL2 CS
Seam Type		-	SMLS
SMYS		MPa	360.0 (52.20 ksi)
SMTS		MPa	460.0 (66.70 ksi)
Young Modulus		MPa	2.07 x 10 ⁵ (30022.9 ksi)
Poison Ratio		-	0.3
Density		kg/m ³	7850
Coefficient of Thermal Expansion		/ ⁰ C	1.1 x 10 ⁻⁵

4.2.5 *Subsea Pipeline External Coating System*

Berikut ini adalah tabel dari *pipeline external coating system*.

Tabel 4.7 *Subsea Pipeline Coating Properties* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Parameter	Units	Value
Asphalt Enamel Thickness	mm	4
Asphalt Enamel Density	kg/m ³	1281.5
Cut-Back - Asphalt Enamel	mm	150

4.2.6 Concrete Coating

Berikut ini adalah tabel propertis dari *concrete coating*.

Tabel 4.8 *Concrete Coating Properties* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Parameters	Units	Value
Density	kg/m ³	3044
Thickness	mm	38
Cut Back	mm	300 ± 10
Absorption	%	5

4.2.7 Corrosion Allowance

Berikut ini adalah tabel korosi internal yang diijinkan untuk semua *section* dari *pipelines* dan *riser*.

Tabel 4.9 *Internal Corrosion Allowance* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Location	Internal Corrosion Allowance (mm)
All section pipeline/Riser	3

4.2.8 Data Lingkungan

1. *Water Depth*

Berikut ini adalah tabel kedalaman air dari dari *pipelines* sepanjang rute yang telah ditentukan.

Tabel 4.10 *Pipeline Water Depth* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Platform Center Position	Parameter
	Water Depth (m)
KC Platform	28.96
KA Platform	29.87

2. *Tidal Range*

Berikut ini adalah tabel data pasang surut yang terjadi sepanjang rute *pipeline*.

Tabel 4.11 *Tidal Data* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Item	Units	Return Period	
		1-Year	100-Year
Storm Tide (Surge)	m	0.152	0.244
Highest Astronomical Tide (HAT)	m	1.158	

3. *Seawater Properties*

Berikut ini adalah tabel dari properti dari air laut yang diberikan.

Tabel 4.12 *Sea Water Properties* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Parameter	Unit	Value
Density of Sea Water	kg/m ³	1025
Sea Water Temperature	°C	26.67
Kinematics Viscosity	m ² /s	1.13 x 10 ⁻⁵

4. *Wave Parameters*

Berikut adalah tabel dari data gelombang yang diberikan.

Tabel 4.13 *Wave Parameters* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Return Period	Maximum Wave		Significant Wave	
	Height (m)	Period (sec)	Height (m)	Period (sec)
1-year	5.09	7.1	2.74	5.42
100-years	8.63	9.4	4.64	7.18

Untuk analisis dalam Tugas Akhir ini menggunakan data gelombang yang signifikan.

5. *Current Data*

Berikut ini adalah data arus yang diberikan.

Tabel 4.14 *Current Data* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Percent of Depth (%)	Current Speed (m/sec)	
	1-year	100-years
0	0.914	1.219
10	0.853	1.128
20	0.792	1.036
30	0.732	0.975
40	0.671	0.884
50	0.61	0.792
60	0.549	0.732
70	0.488	0.671
80	0.427	0.61
90	0.366	0.518
100	0.244	0.305

6. *Hydrodynamics Coefficient*

Berikut ini adalah tabel dari data koefisien hidrodinamis yang diberikan.

Tabel 4.15 *Hydrodynamic Coefficient* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Parameter	Riser	Pipeline
Drag Coefficient	0.7 – 1.0	0.7 – 1.2
Lift Coefficient	0	0.9
Inertia Coefficient	2	3.29

7. *Soil Parameters*

Berikut ini adalah data parameter tanah yang diberikan

Tabel 4.16 *Soil Parameters* (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Parameter	Units	Value
Soil Type	-	Very Soft Clay
Undrained Shear Strength	kPa	2.0 – 5.0
Angle Friction	Deg	0
Submerged Weight ²⁾	kg/m ³	815.7

8. *Marine Growth*

Untuk analisis ini menggunakan data ketebalan dari *marine growth* sebesar 50.8 mm dengan densitas sebesar 1233 kg/m³.

9. *Pipeline Allowable Span*

Panjang *span* dari 6" KA-KC Gas Lift Pipeline yang diijinkan di lokasi *crossing* tidak boleh melebihi 20 m.

4.3 Hasil Perhitungan Analisis Tegangan

Perhitungan tegangan dari *pipeline* ini nantinya akan digunakan untuk analisis statik dari *free span* yang bertujuan mencari nilai dari aktual *span* yang akan digunakan dalam analisis dinamis dari *free span*. Adapun parameter-parameter yang dicari adalah *hoop stress*, *longitudinal stress*, dan *combined stress (von Mises)*. Untuk rules yang digunakan adalah ASME B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*. Selain itu, analisis tegangan ini hanya dilakukan pada kondisi operasi.

Adapun *input* yang digunakan dalam perhitungan tegangan pipa ini adalah sebagai berikut.

Tabel 4.17 Data *Input* untuk Perhitungan Analisis Tegangan

Parameter	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Diameter pipa (OD)	6.62598425	in	168.3	mm	0.1683	m
Ketebalan Pipa (t)	0.37519685	in	9.53	mm	0.00953	m
Max Capacity	700 BPOD					
Hydrotest Pressure	1334.35	psi	9.2	MPa	9200000	N/m ²
Design Pressure	942.75	psi	6.5	MPa	6500000	N/m ²
Operating Pressure	603.36	psi	4.16	MPa	4160000	N/m ²
Mechanical Design Temp.	200	°F	93.3	°C		
Operating Temperature (T)	85	°F	29.44	°C		
Installation Temperature (T ₀)	105	°F	40.55	°C		
Massa Jenis Gas	38.48	lb/ft ³	616.3904562	kg/m ³		
Kelas Material Pipa	API 5L Grade X52MO or X52QO PSL2 CS					
SMTS	66.72	ksi	460	MPa	4.6E+08	N/m ²
SMYS	52.21	ksi	360	MPa	3.6E+08	N/m ²
Fluida Isi	Gas					
Modulus Young (E)	30022.80	ksi	207000	MPa	2.07E+11	N/m ²
Rasio Poisson (ν)	0.3		0.3			
Massa Jenis Pipa	490.06	lb/ft ³	7850	kg/m ³		
Koefisien Ekspansi Termal (α)	0.0000211	in/in °F	0.0000117	/°C		

Berikut ini adalah tabel beberapa perhitungan variabel tegangan dari *pipelines*.

Tabel 4.18 Perhitungan Analisis Tegangan

Parameter Perhitungan	Rumus	Nilai	Satuan
Internal Pressure	$P_i = \frac{(2 \cdot SMYS \cdot t)}{D} F \cdot E \cdot T$	= 2.29E+07	N/m ²
Tegangan Hoop (σ_h)	$\sigma_h = P_i \frac{D}{2t}$	= 1.16E+08	N/m ²
Tegangan Poisson (σ_p)	$\sigma_p = \nu \sigma_h$	= 3.47E+07	N/m ²
Tegangan Ekspansi Termal (σ_T)	$\sigma_T = -E\alpha (T - T_0)$	= 2.69E+07	N/m ²
Tegangan Longitudinal (σ_L)	$\sigma_L = \sigma_p - \sigma_T$	= 7.82E+06	N/m ²
Tegangan Ekuivalen (σ_E)	$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2}$	= 1.16E+08	N/m ²
Note :			
E	: longitudinal joint factor	= 1	(berdasarkan ASME B 31.8.2000) untuk kelas material pipa API 5L
T	: temperature Derating Factor untuk kondisi suhu kurang dari 250°	= 1	(berdasarkan ASME B 31.8.2000) untuk kelas material pipa API 5L
F	: faktor desain untuk riser dan pipelines	= 0.8	(berdasarkan ASME B 31.8.2000) untuk kelas material pipa API 5L

Setelah perhitungan dilakukan, berikut ini adalah tabel validasi perhitungan tegangan dengan kriteria yang telah ditentukan berdasarkan ASME B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System*.

Tabel 4.19 Validasi Hasil Perhitungan Tegangan

Criteria	Allowable	MPa	N/m ²	Result Calculation		Ket.
				MPa	N/m ²	
Hoop Stress	72% SMYS	259.2	259200000	115.7481637	115748163.69	Pass
Longitudinal Stress	80% SMYS	288	288000000	7.817140108	7817140.11	Pass
Combined Stress	90% SMYS	324	324000000	116.0118316	116011831.63	Pass

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai **hoop stress** sebesar **115.75 MPa**, **longitudinal stress** sebesar **7.817 MPa**, dan **combined stress (von Mises)** sebesar **116.01 MPa**. Sedangkan nilai tegangan yang diijinkan masing-masing sebesar 259.2 MPa (*hoop stress*), 288 MPa (*longitudinal stress*), dan 324 MPa (*combined stress*). Berdasarkan perbandingan nilai tegangan yang menjadi kriteria terhadap nilai tiap tegangan yang dicari, didapatkan kesimpulan bahwa seluruh nilai tegangan tidak melebihi nilai kriteria

tegangan yang diijinkan sehingga tegangan yang terjadi tidak membuat struktur gagal.

4.4 Hasil Perhitungan Analisis Statik *Free Span*

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, dalam menentukan panjang *span* maksimum yang diijinkan, ditentukan oleh *vortex shedding requirement* (VIV, *vortex induced vibration*) dan *yielding requirement* (analisa kondisi statis). Adapun keluaran (*output*) dari perhitungan analisis statik *free span* ini adalah panjang aktual yang nantinya digunakan untuk perhitungan analisis dinamis dari *free span* ini.

Berikut ini adalah tabel hasil perhitungan analisis statik dari *free span*.

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Analisis Statik *Free Span*

Parameter Perhitungan	Rumus	Nilai	Satuan
Tegangan Ekuivalen (σ_E)	$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2}$	= 1.16E+08	N/m ²
Momen Inertia Penampang Pipa (I_{pipa})	$I_{pipa} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{pipa}))^4)$	= 1.503E-05	m ⁴
Gaya Drag (F_D)	$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	= 1.369E+01	N/m
Gaya Inertia (F_I)	$F_I = C_M \times \frac{\pi D^2}{4} \times \rho_{seawater} \times \frac{dU}{dt}$	= 4.335E+00	N/m
Berat Pipa yang Terendam (W_{sub})	$W_{sub} = W_{pipa} + W_{coat} + W_{concrete} + W_{ftuida} - W_{bouy}$	= 5.655E+02	N/m
Berat Pipa Terdistribusi merata	$W_t = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2}$	= 5.658E+02	N/m
Panjang Allowable Span Static (L_{st})	$L_{st} = \sqrt{\frac{2 \cdot C \cdot I \cdot \sigma_e}{W_t \cdot D}}$	= 1.567E+01	m
Note :			
C_M	: koefisien <i>added mass</i>	= 2	(berdasarkan DNV 1981 tentang <i>Submarine Pipelines System</i>)
C_I	: koefisien <i>inertia</i>	= $C_M + 1$	
dU/dt	: percepatan horizontal aliran (m/s ²)	= $\dot{u} = \omega^2 a e^{kz} \cos(\omega t - kx)$	= 0.031203 m ²
C	: konstanta ujung peletakan	= 9.87	Untuk Kondisi <i>fixed-fixed</i> (berdasarkan DNV 1981)
D	: diameter terluar pipa (m)	= 0.2398	

Berdasarkan dari tabel perhitungan di atas, didapatkan nilai panjang *span* pada lokasi *crossing* sebesar **15.67 m**. Sedangkan kriteria panjang *span* yang diijinkan pada lokasi *crossing* adalah sebesar 20 m. Maka dari itu, nilai dari

panjang *span* dari analisa statik ini masih memenuhi kriteria dan dapat digunakan sebagai panjang aktual dalam analisis dinamis dari *free span*.

4.5 Hasil Perhitungan Analisis Dinamis *Free Span*

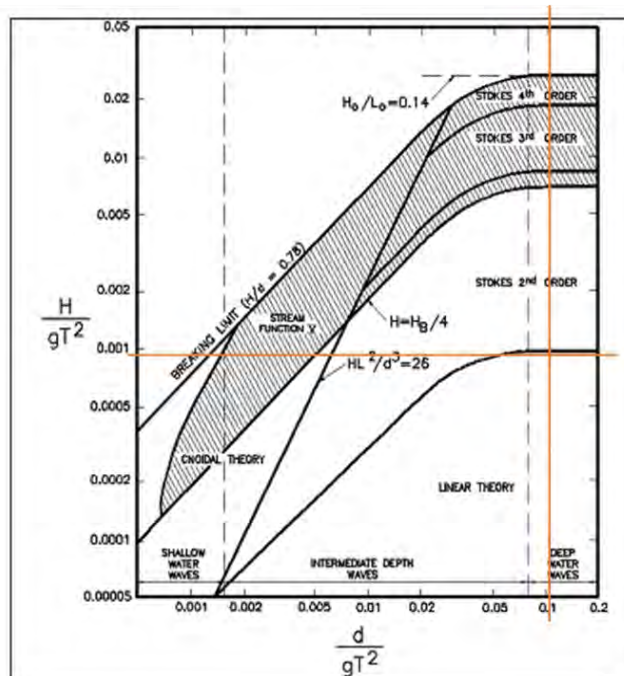
4.5.1 Pemilihan Teori Gelombang

Seperti yang telah diterangkan di bab sebelumnya, untuk menentukan teori gelombang yang akan dipakai dalam analisis ini, kita haru menggunakan grafik *Region of Validity of Wave Theories*. Berdasarkan data gelombang yang diberikan, dimana untuk data gelombang 1 tahunan, nilai tinggi gelombangnya (H) adalah 2.74 m dengan periode (T) 5.42 s serta kedalaman (d) sebesar 29.87 m, didapatkan :

$$\frac{H}{gT^2} = \frac{2.74}{(9.8)(5.42)^2} = 0.00095$$

$$\frac{d}{gT^2} = \frac{29.87}{(9.8)(5.42)^2} = 0.10375$$

Setelah mendapatkan nilai parameter tersebut, masukkan ke dalam grafik *Region of Validity of Wave Theories* yang ditunjukkan dibawah ini.



Gambar 4.4 *Region of Validity of Wave Theories (Coastal Engineering Manual, 2007)*

Dari gambar di atas, dapat kita lihat bahwa setelah memasukkan parameter-parameter tadi, akhirnya didapatkan teori gelombang *airy* (linier) dengan kondisi perairan *deep sea* (kondisi perairan dalam) sebagai teori gelombang yang akan digunakan dalam mencari *wave velocity*. Namun, dalam kasus ini, karena kondisi perairan berada pada *deep sea* dimana pengaruh beban gelombang sangat kecil, maka perhitungan kecepatan gelombang ditiadakan dan penggunaan beban gelombang hanya dikhususkan pada beban arus.

4.5.2 Perhitungan Kecepatan Arus

Sebenarnya, untuk data dari kecepatan arus telah diberikan, dimana kecepatan tersebut diberikan berdasarkan persentase 0-100 persen kedalaman dengan skala 10. Namun posisi dari pipa itu sendiri tidak berada tepat pada *seabed*, sehingga berada diantara persentase kedalaman 90 hingga 100 persen. Sehingga, untuk mendapatkan kecepatan yang tepat mengenai pipa, kita harus melakukan interpolasi. Persamaan interpolasi yang digunakan adalah persamaan interpolasi linear karena distribusi perbandingan kecepatannya mendekati linear. Perlu diketahui bahwa posisi *pipelines* berada pada kedalaman yaitu : kedalaman pipa = kedalaman laut – (jari-jari luar pipa + gap) = 29.87 m – (0.1199 m + 1 m) = 28.7501 m. Kemudian nilai tersebut dikonversi menjadi persentase dengan cara : (kedalaman pipa : kedalaman air) x 100 persen = (28.7501 : 29.87) x 100% = 96.25 %. Berikut ini adalah langkah pengerjaan untuk menentukan kecepatan arus menggunakan teori interpolasi.

diketahui :							
X ₁	=	90%					
X ₂	=	kedalaman pipa : kedalaman laut (d)				=	96.25%
X ₃	=	100%					
y ₁	=	0.518	m/s	(kecepatan pada kedalaman 90%)			
y ₂	= ?					
y ₃	=	0.305	m/s	(kecepatan pada kedalaman 100%)			
penyelesaian :							
$y_2 = \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} + y_1$			=	0.384875	m/s		

Gambar 4.5 Langkah Pengerjaan Interpolasi

Berdasarkan perhitungan diatas, didapatkan kecepatan arus pada kedalaman pipa 28.7501 m yaitu 0.384875 m/s. Perlu diketahui, bahwa nilai kecepatan ini masih berupa nilai kecepatan arus pada kedalaman 28.7501 m, yang berarti bahwa kecepatan ini merupakan kecepatan yang dihitung berdasarkan *outer zone*, sedangkan aliran arus yang memiliki pengaruh besar terhadap *free span* adalah aliran yang berada pada *inner zone* yang juga telah mempertimbangkan tingkat kekasaran dari *seabed*. Maka dari itu, kecepatan pada *inner zone* adalah sebagai berikut :

		$U(z) = U(z_r) \cdot R_c \cdot \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))}$	=	3.05E-01	m/s
keterangan :					
$U(z)$:	kecepatan arus yang dihitung dari atas <i>seabed</i> hingga ke permukaan <i>free span</i> (m/s)	=	0.304624631	m/s
$U(z_r)$:	kecepatan arus yang dihitung dari atas <i>seabed</i> hingga ke permukaan <i>free span</i> (m/s)	=	0.384875	m/s
Z_o	:	parameter kekasaran <i>seabed</i> (m)	=	5.00E-06	m
Z_r	:	ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga ke permukaan <i>free span</i> (m)	=	28.7501	m
z	:	ketinggian di atas <i>seabed</i> hingga permukaan pipa (m)	=	1.1199	m
R_c	:	<i>reduction factor</i> : $R_c = \sin(\Theta_{rel})$	=	1	
Θ_{rel}	:	sudut datang arus terhadap <i>freespan</i>	=	90	°

Gambar 4.6 Langkah Pengerjaan Kecepatan Arus pada *Inner Zone*

Berdasarkan perhitungan di atas, nilai dari parameter kekerasan *seabed* didapatkan dari tabel parameter kekerasan *seabed* yang ada di DNV-RP-F105, yaitu untuk tipe tanah *slit* atau *clay*, nilai Z_o adalah sebesar $5 \cdot 10^{-6}$ m. Maka dari itu, didapatkan nilai kecepatan arus pada *inner zone* adalah 0.304625 m/s.

4.5.3 Penentuan Klasifikasi Respon *Free Span* dan Kriteria Respon Pipa terhadap Rasio Aliran Arus dan Kecepatan

Dalam melakukan analisa dinamis *free span*, kriteria respon *free span* dan rasio aliran merupakan elemen penting karena merupakan langkah awal dalam melakukan analisis ini. Untuk rasio aliran arus dan kecepatan (α) merupakan faktor yang menentukan dampak aliran terhadap pipa, baik dari arah *in-line* (searah arus) atau arah *cross-flow* (tegak lurus dengan arah arus). Selain itu, rasio aliran (α) juga merupakan salah satu kriteria apakah kita

perlu melakukan analisis *fatigue* atau tidak. Sedangkan kriteria respon pipa (L/D) bertujuan juga menjadi salah satu *screening* utama dalam mengetahui respon *free span* berdasarkan panjang aktual *span* (L) dan D (diameter terluar pipa) yang sedang dianalisis.

Untuk Tugas Akhir ini, untuk nilai respon pipa (L/D) terhadap *free span* yaitu sebesar : $L/D = 15.67 \text{ m} / 0.2398 \text{ m} = 65.346$. Dari nilai ini kita dapat mengelompokkan pada kelompok yang kedua berdasarkan tabel klasifikasi respon pipa terhadap *free span* (DNV-RP-F105), yaitu pada kriteria $30 < L/D < 100$ yang mengatkan bahwa panjang *span* dikhususkan untuk kondisi operasi, serta *boundary condition* dan gaya efektif aksial menentukan frekuensi naturalnya.

Tabel 4.21 Klasifikasi Respon *Free Span*

L/D	Response description
$L/D < 30$ ¹⁾	<u>Very little dynamic amplification.</u> Normally not required to perform comprehensive fatigue design check. Insignificant dynamic response from environmental loads expected and unlikely to experience VIV
$30 < L/D < 100$	<u>Response dominated by beam behaviour</u> Typical span length for operating conditions. Natural frequencies sensitive to boundary conditions (and effective axial force).
$100 < L/D < 200$	<u>Response dominated by combined beam and cable behaviour</u> Relevant for free spans at uneven seabed in temporary conditions. Natural frequencies sensitive to boundary conditions, effective axial force (including initial deflection, geometric stiffness) and pipe "feed in".
$L/D > 200$	<u>Response dominated by cable behaviour</u> Relevant for small diameter pipes in temporary conditions. Natural frequencies governed by deflected shape and effective axial force.

1) For hot pipelines (response dominated by the effective axial force) or under extreme current conditions ($U_c > 1.0\text{-}2.0 \text{ m/s}$) this L/D limit may be misleading.

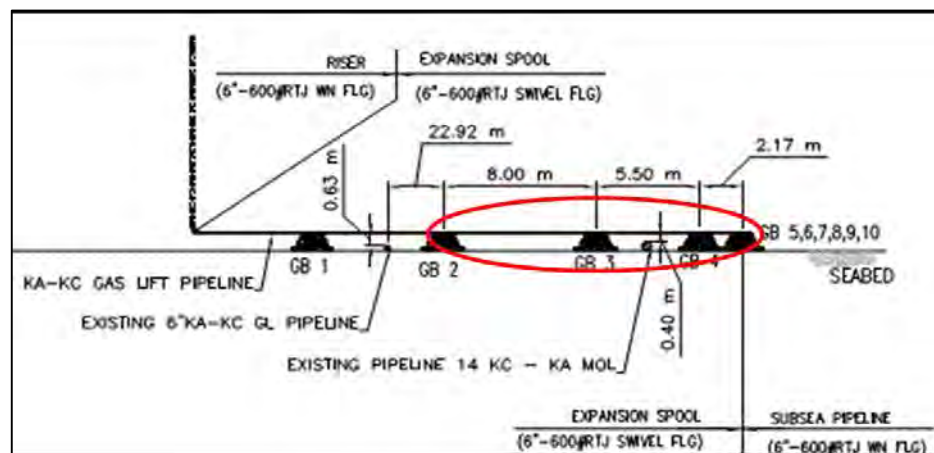
Sedangkan untuk nilai respon aliran arus (α) didapatkan sebesar : $\alpha = U_c / (U_c + U_w) = (0.3046246 \text{ m/s}) / (0.3046246 \text{ m/s}) = 1$ (nilai kecepatan gelombang diabaikan). Nilai respon aliran ini masuk dalam kelompok kategori arus dominan $U_w \ll U_c$, yang berarti bahwa untuk pembebanan arah *in line* berdasarkan *steady drag component* dan *oscillatory component* akibat *vortex shedding* serta untuk pembebanan pada arah ini tidak menggunakan persamaan morison, sedangkan untuk arah *cross-flow* sendiri berarti bawah pengaruh *vortex shedding* terjadi secara siklik dan menunjukkan arus murni yang dominan.

Tabel 4.22 Klasifikasi Kriteria Respon Pipa terhadap Rasio Aliran Arus

$\alpha < 0.5$	<p><u>wave dominant - wave superimposed by current.</u> <u>In-line direction:</u> in-line loads may be described according to Morison's formulae, see section 5. In-line VIV due to vortex shedding is negligible. <u>Cross-flow direction:</u> cross-flow loads are mainly due to asymmetric vortex shedding. A response model, see section 4, is recommended.</p>
$0.5 < \alpha < 0.8$	<p><u>wave dominant - current superimposed by wave</u> <u>In-line direction:</u> in-line loads may be described according to Morison's formulae, see section 5. In-line VIV due to vortex shedding is mitigated due to the presence of waves. <u>Cross-flow direction:</u> cross-flow loads are mainly due to asymmetric vortex shedding and resemble the current dominated situation. A response model, see section 4, is recommended.</p>
$\alpha > 0.8$	<p><u>current dominant</u> <u>In-line direction:</u> in-line loads comprises the following components : <ul style="list-style-type: none"> a steady drag dominated component a oscillatory component due to regular vortex shedding For fatigue analyses a response model applies, see section 4. In-line loads according to Morison's formulae are normally negligible. <u>Cross-flow direction:</u> cross-flow loads are cyclic and due to vortex shedding and resembles the pure current situation. A response model, see section 4, is recommended.</p>

4.5.4 Perhitungan Analisis Dinamis *Free Span*

Dalam perhitungan analisis dinamis *free span*, ada beberapa perhitungan utama yang dilakukan sebelum mendapatkan panjang *allowable span*, yaitu perhitungan luas penampang, massa, berat, *concrete stiffness factor* (CSF), *hydrodynamic parameter* dan gaya efektif aksial, *reduced velocity*, dan perhitungan frekuensi natural untuk arah *in-line* dan *cross-flow*.



Gambar 4.7 Geometri *Free Span* yang Ditinjau (Pertamina Hulu Energy, 2012)

Gambar di atas merupakan geometri tampak samping dari *free span* yang ditinjau. Dimana, dapat kita lihat bahwa daerah yang ditinjau berada pada lingkaran merah, dan berdasarkan batasan masalah yang telah ditentukan, kondisi *grout bag* 3 dan 4 dianggap gagal, sehingga panjang dari *free span* bernilai 15.67 m dengan besar *gap* yang terjadi adalah 0.4 m.

Adapun *input* yang digunakan untuk perhitungan analisis dinamis *free span* adalah sebagai berikut.

Tabel 4.23 Data *Input* untuk Analisis Dinamis *Free Span*

PIPE DATA	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Pipe Outside Diamater	M	OD	0.1683
Pipe Wallthickness	M	t_{pipa}	0.00953
Pipe Density	Kg/M ³	ρ_{pipa}	7850
Modulus Elasticity of Pipe	N/M ²	E_{pipa}	2.07E+11
COATING DATA	SATUAN	SYMBOL	VALUE
External Corrosion Coating Thickness	M	t_{coat}	0.004
Corrosion Coating Density	Kg/M ³	ρ_{coat}	1281.5
CONCRETE DATA	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Concrete Weight Coating Thickness	M	$t_{concrete}$	0.03175
Concrete Density	Kg/M ³	$\rho_{concrete}$	3044
Modulus Elasticity of Concrete	N/M ²	$E_{concrete}$	4.10E+10
OPERATING DATA	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Density Fluida	Kg/M ³	ρ_{fluida}	38.5
Operating Pressure	N/M ²	P	4160000
Actual Span Length	M	L	15.67
Span Gap	M	e	0.4
Poisson's Ratio		ν	0.3
Thermal Expansion coefficient	/°C	α_e	0.000011
Hydrotest Internal Pressure	N/M ²	P_{hyd}	9200000
Design Internal Pressure	N/M ²	P_{de}	6550000
Effective Lay Tension	N	H_{eff}	0
Temperature Difference to As-Laid	°C	ΔT	16.6
SOIL INPUT PROPERTIES	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Soil Type		Very Soft Clay	
Coefficient for Vertical (Cross-Flow) Stiffness	N/M ^{5/2}	C_v	1200000
Coefficient for Lateral (In-Line) Stiffness	N/M ^{5/2}	C_L	800000

Tabel 4.24 Data *Safety Factor* untuk Analisis Dinamis *Free Span*

SAFETY FACTOR		
FOR FATIGUE	SYMBOL	VALUE
Natural Frequency	ν_f	1.15
Stabilitas Parameter	ν_k	1.3
VIV Onset of In-Line	$\nu_{on,IL}$	1.1
VIV Onset of Cross-Flow	$\nu_{on,CF}$	1.2
Structural Damping Ratio	ζ_{str}	0.005
Soil Damping Ratio	ζ_{soil}	0.001
Hydrodynamic Dumping Ratio	ζ_h	0
FOR SCREENING CRITERIA	SYMBOL	VALUE
In-Line motion	ν_{IL}	1.15
Cross-Flow motion	ν_{CF}	1.3
BOUNDARY	SYMBOL	VALUE
	C_1	3.56
	C_2	0.25
	C_3	0.2
	C_6	0.00260417
		Fixed - Fixed

Untuk penentuan kondisi batas untuk metode peletakan yang digunakan adalah metode peletakan *fixed-fixed* karena masing-masing ujungnya tidak diperbolehkan bergerak dalam arah *in-line* dan *cross-flow* terhadap arah aliran arus, dan juga tidak diperbolehkan berotasi terhadap sumbu pipanya

Tabel 4.25 Data Lingkungan untuk Analisis Dinamis *Free Span*

ENVIRONMENT DATA	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Sea Water Density	Kg/M ³	$\rho_{sea\ water}$	1025
Current Velocity	M/s	$U_{C,100yr}$	0.3046246

Untuk data arus merupakan data hasil perhitungan sebelumnya yang telah dilakukan (ada di sub-bab sebelumnya).

Berikut ini adalah tabel hasil perhitungan tiap variabel yang digunakan dalam analisis dinamis *free span*.

1. Perhitungan luas penampang

Pipa bawah laut ini terdiri dari beberapa lapisan yaitu, pipa baja, lapisan *coating* atau anti-korosi dan lapisan pemberat atau *concrete*. Pipa dalam schedule NPS hanya terdiri lapisan baja saja belum ditambah lapisan

coating dan *concrete*. Sedangkan dalam melakukan analisis membutuhkan parameter total, sehingga diperlukan penjumlahan diameter, tebal, dan luasan yang ada. Detail dari perhitungan luas penampang disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.26 Perhitungan Luas Penampang

CROSS AREA CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
External Pipe Diameter	$D = OD + (2 \times t_{coat}) + (2 \times t_{concrete})$	M	D	0.2398
Internal Cross Section Area	$A_i = \frac{\pi}{4} \times (OD - (2 \times t_{pipe}))^2$	M ²	A_i	0.0175
Steel Pipe Cross Section Area	$A_{pipe} = \left(\frac{\pi}{4} \times OD^2\right) - A_i$	M ²	A_{pipe}	0.0048
Coating Layer Cross Section Area	$A_{coat} = \left(\frac{\pi}{4} \times (OD + (2 \times t_{coat}))^2\right) - A_i - A_{pipe}$	M ²	A_{coat}	0.0022
Concrete Cross Section Area	$A_{concrete} = \left(\frac{\pi}{4} \times (OD + (2 \times t_{coat}) + (2 \times t_{concrete}))^2\right) - A_i - A_{pipe} - A_{coat}$	M ²	A_{concrete}	0.0208

Berdasarkan tabel di atas, didapatkan nilai diameter total (**D**) sebesar **0.2398 m**. Nantinya nilai ini akan digunakan dalam perhitungan selanjutnya

2. Perhitungan massa

Dalam menentukan massa efektif ini, perhitungan dilakukan dengan menambah massa fluida kedalam pipa dan massa tambah akibat interaksi pipa dengan lingkungan, dalam hal ini adalah massa air laut yang dipindahkan oleh *displacement* pipa. Detail dari perhitungan massa disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.27 Perhitungan Massa

MASS CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Mass of Fluida	$M_{fluida} = A_i \times \rho_{fluida}$	Kg/M	M_{fluida}	0.6737
Mass of Pipe	$M_{pipa} = A_{pipa} \times \rho_{pipa}$	Kg/M	M_{pipa}	37.3298
Mass of Coating	$M_{coat} = A_{coat} \times \rho_{coat}$	Kg/M	M_{coat}	2.7758
Mass of Concrete	$M_{concrete} = A_{concrete} \times \rho_{concrete}$	Kg/M	$M_{concrete}$	63.1947
Mass Struktur	$M_{struktur} = M_{pipa} + M_{coat} + M_{concrete}$	Kg/M	$M_{struktur}$	103.3003
Mass of Disposal Water/Bouyancy	$M_{bouy} = \frac{\pi}{4} \times ID^2 \times \rho_{seawater}$	Kg/M	M_{bouy}	46.3113
Added Mass Coeficient	$C_a = \begin{cases} 0.68 + \left(\frac{1.6}{1 + \left(5 \times \frac{e}{D} \right)} \right) & ; \text{ untuk } e/D < 0.8 \\ 1 & ; \text{ untuk } e/D \geq 0.8 \end{cases}$		C_a	1.0000
Added Mass	$M_a = C_a \times M_{bouy}$	Kg/M	M_a	46.3113
Effective Mass	$M_e = M_{fluida} + M_{struktur} + M_a$	Kg/M	M_e	150.2853
Specific Mass Ratio	$M_{ratio} = \frac{M_{struktur}}{M_{bouy}}$		M_{ratio}	2.2306

Tabel di atas menunjukkan nilai massa efektif (M_{eff}) yang didapatkan dari hasil perhitungan adalah sebesar **150.2853 kg/m**. Nantinya nilai ini juga yang akan digunakan dalam perhitungan selanjutnya

3. Perhitungan berat

Perhitungan ini bertujuan untuk mengetahui beban lateral yang timbul akibat berat pipa itu sendiri. Berat pipa yang dihitung adalah berat material (baja), berat muatan pipa (dalam kondisi operasi), berat *coating*, berat *concrete*, berat akibat *bouyancy*. Detail dari perhitungan berat disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.28 Perhitungan Berat

WEIGHT CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Pipe weight per meter	$W_{pipa} = M_{pipa} \times 9.8067$	N/M	W_{pipa}	366.0821
Coating weight per meter	$W_{coat} = M_{coat} \times 9.8067$	N/M	W_{coat}	27.2215
Concrete weight per meter	$W_{concrete} = M_{concrete} \times 9.8067$	N/M	$W_{concrete}$	619.732
Fluida Weight per Meter	$W_{fluida} = M_{fluida} \times 9.8067$	N/M	W_{fluida}	6.6072
Bouyance force per meter	$W_{bouy} = M_{bouy} \times 9.8067$	N/M	W_{bouy}	454.1609

4. Perhitungan *concrete stiffness enhancement factor*

Perhitungan *concrete stiffness enhancement factor* merupakan perhitungan faktor kekakuan dari *concrete* yang dipengaruhi oleh momen inersia pipa dan momen inersia dari *concrete* itu sendiri. Detail dari perhitungan *concrete stiffness enhancement factor* disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.29 Perhitungan *Concrete Stiffness Enhancement Factor*

CONCRETE STIFFNESS CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Moment Inersia of Pipe	$I_{pipa} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{pipa}))^4)$	M ⁴	I_{pipa}	0.000015
Moment Inersia of Concrete	$I_{concrete} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{concrete}))^4)$	M ⁴	$I_{concrete}$	0.000115
Concrete Stiffness Enhancement Factor	$CFS = 0.25 \times \left(\frac{E_{concrete} \times I_{concrete}}{E_{pipa} \times I_{pipa}} \right)^{0.75}$		CFS	0.341204

5. Perhitungan *hydrodynamic parameter*

Perhitungan hidrodinamis merupakan parameter yang ditinjau dari sisi beban lingkungan yang mengenai pipa. Selain ini, perhitungan ini nantinya akan banyak berpengaruh terhadap perhitungan respon model untuk arah *in-line* dari *free span*. Detail dari perhitungan *hydrodynamic parameter* disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.30 Perhitungan *Hydrodynamic Parameter*

HYDRODYNAMIC CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Reynould Number (Re)	Drag Force Coefficient		C_D	1.2
$Re = \frac{U \times D}{\nu}$				
$\nu = 1.13 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}$ atau $1.14856 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$				
Keulegan - Carpenter Number (KC)	Lift Force Coefficient		C_L	1
$KC = \frac{U_w}{f_w \times D}$				
Current Flow Ratio	$\alpha = \frac{U_c}{U_w + U_c}$		α	1.00000
Drag Force	$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	N/M	F_D	13.6853
Lift Force	$F_L = C_L \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	N/M	F_L	11.4044
Effective Axial Force	$S_{eff} = H_{eff} - \Delta p_i A_i (1 - 2v) - A_{pipa} E \Delta T \alpha_e$	N/M	S_{eff}	-1.61E+05

Berdasarkan tabel di atas dapat kita lihat bahwa nilai *Reynold number* (Re) yang didapatkan adalah **64645.121** atau di atas dari 50000, sehingga nilai koefisien gaya geser (C_D) adalah **1.2** dan koefisien gaya angkat (C_L) adalah **1**, sesuai dari ketentuan pada DNV 1981. Dimana, nilai C_D dan C_L didapatkan berdasarkan DNV 1981 mengenai *Rules Of Submarine Pipeline System* untuk kriteria Re diantara 5×10^4 hingga 1×10^5 . Selain itu nilai dari *current flow ratio* (α) bernilai 1 karena pengaruh beban gelombang ditiadakan.

6. Perhitungan faktor koreksi

Perhitungan faktor koreksi diperlukan karena variabel di dalamnya memiliki pengaruh perhitungan dalam respon model untuk arah *cross-flow*. Karena *reduced velocity* untuk arah *cross-flow* lebih dipengaruhi oleh *gap span* dan parameter stabilitas. Detail dari perhitungan *reduced velocity* disajikan dalam tabel berikut ini.

Tabel 4.31 Perhitungan Faktor Koreksi

CORECTION FACTOR CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Total Damping Ratio	$\zeta_T = \zeta_{soil} + \zeta_{str} + \zeta_h$		ζ_T	0.006
Stability Parameters	$K_s = \frac{4 \times \pi \times M_e \times \zeta_T}{\rho_{seawater} \times D^2}$		K_s	0.1923
Stability Parameters Factor	$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k}$		K_{sd}	0.1479
Seabed Correction Factor	$\psi_{prox, onset} = \begin{cases} \frac{1}{4} \times \left(3 + \left(1.25 \times \frac{e}{D} \right) \right); & \text{untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & ; \text{untuk } \frac{e}{D} \geq 0.8 \end{cases}$		$\gamma_{prox, onset}$	1.0000
Mass Correction Factor	$\psi_{mass, onset} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \times M_{ratio}; & \text{untuk } M_{ratio} < 1.5 \\ 1 & ; \text{untuk } M_{ratio} \geq 1.5 \end{cases}$		$\gamma_{mass, onset}$	1.0000
Current Correction Factor	$\psi_{\alpha, onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3}; & \text{untuk } \alpha < 1.5 \\ 1.167; & \text{untuk } \alpha \geq 1.5 \end{cases}$		$\gamma_{\alpha, onset}$	1.3333

7. Perhitungan respon model

Perhitungan respon model merupakan perhitungan utama dalam analisis dinamis *free span*. Dalam perhitungan inilah kita dapat melihat apakah

beban yang mengenai pipa akan membentuk *vortex*, yang mana *vortex* tersebut akan menimbulkan vibrasi yang berlebihan sehingga dapat menyebabkan kegagalan. Selain itu, dalam perhitungan ini juga kita dapat menentukan nilai panjang *allowable span* dengan membandingkan nilai panjang efektif *span* yang terkecil berdasarkan perhitungan baik dari arah *in-line* maupun dari arah *cross-flow*. Berikut ini adalah tabel hasil perhitungan respon model untuk arah *in-line* dan *cross-flow* serta ringkasan hasil perhitungan analisis dinamis *free span* untuk kedua arah.

Tabel 4.32 Perhitungan Respon Model Untuk Kondisi *In-Line Motion*

IN-LINE MOTION	IN-LINE CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
	Dynamic Soil Stiffness	$K_L = C_L \times \left(\frac{2}{3} \times M_{ratio} + \frac{1}{3} \right) \times \sqrt{D}$	N/M ²	K_L	7.13E+05
	Relative Soil Stiffness Parameter	$\beta_L = {}^{10}\log \left(\frac{K_L \times L^4}{(1 + CSF) \times E_{pipa} \times I_{pipa}} \right)$		β_L	4.01
	Effective Span	$L_{eff,IL} = L \times \begin{cases} \frac{4.73}{(-0.066 \times \beta_L^2) + (1.02 \times \beta_L) + 0.63} & ; \text{ untuk } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{(0.036 \times \beta_L^2) + (0.61 \times \beta_L) + 1} & ; \text{ untuk } \beta < 2.7 \end{cases}$	M	$L_{eff,IL}$	20.25
	Hydrodynamic Total Force	$F_{tot} = F_D + F_L$	N/M	F_{tot}	25.09
	Euler Load	$P_{E,IL} = (1 + CSF) \times \frac{\pi^2 \times E_{pipa} \times I_{pipa}}{L_{eff,IL}^2}$	N	$P_{E,IL}$	1.00E+05
	Static Deflection	$\delta_{IL} = C_6 \times \frac{F_{tot} \times L_{eff,IL}^4}{E_{pipa} \times I_{pipa} \times (1 + CSF)} \times \frac{1}{\left(1 + C_2 \times \frac{S_{eff}}{P_{E,IL}} \right)}$	M	δ_{IL}	4.40E-03
	Fundamental Natural Frequency	$f_{0,IL} = C_1 \times \sqrt{(1 + CSF) \times \frac{E_{pipa} \times I_{pipa}}{M_e \times L_{eff,IL}^4} \times \left(1 + \left(C_2 \times \frac{S_{eff}}{P_{E,IL}} \right) + \left(C_3 \times \left(\frac{\delta_{IL}}{D} \right)^2 \right) \right)}$	Hz	$f_{0,IL}$	1.12
	Onset Reduced Velocity	$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{ untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} & ; \text{ untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} & ; K_{sd} > 1.6 \end{cases}$		$V_{R,onset}^{IL}$	1.10
	Screening Check Criteria	$\frac{f_{0,IL}}{\gamma_f} > \frac{U_{c,100yr}}{V_{R,onset}^{IL} \times D} \times \left(1 - \frac{L/D}{250} \right) \times \frac{\gamma_{IL}}{\alpha}$	0.974	>	0.981 NOT COMPLY

Tabel 4.33 Perhitungan Respon Model untuk Kondisi *Cross-Flow Motion*

CROSS-FLOW MOTION	CROSS-FLOW CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
	Dynamic Soil Stiffness	$K_V = C_v \times \left(\frac{2}{3} \times M_{ratio} + \frac{1}{3} \right) \times \sqrt{D}$	N/M ²	K_V	1.07E+06
	Relative Soil Stiffness Parameter	$\beta_V = {}^{10}\log \left(\frac{K_V \times L^4}{(1 + CSF) \times E_{pipa} \times I_{pipa}} \right)$		β_V	4.19
	Effective Span	$L_{eff,CF} = L \times \begin{cases} \frac{4.73}{(-0.066 \times \beta_V^2) + (1.02 \times \beta_V) + 0.63} & ; \text{ untuk } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{(0.036 \times \beta_V^2) + (0.61 \times \beta_V) + 1} & ; \text{ untuk } \beta < 2.7 \end{cases}$	M	$L_{eff,CF}$	19.79
	Submerged Weight	$q = W_{pipa} + W_{coat} + W_{concrete} + W_{fluida} - W_{bouy}$	N/M	q	565.48
	Euler Load	$P_{E,CF} = (1 + CSF) \times \frac{\pi^2 \times E_{pipa} \times I_{pipa}}{L_{eff,CF}^2}$	N	$P_{E,CF}$	1.05E+05
	Static Deflection	$\delta_{CF} = C_6 \times \frac{q \times L_{eff,CF}^4}{E_{pipa} \times I_{pipa} \times (1 + CSF)} \times \frac{1}{\left(1 + C_2 \times \frac{S_{eff}}{P_{E,CF}} \right)}$	M	δ_{CF}	0.08782
	Fundamental Natural Frequency	$f_{0,CF} = C_1 \times \sqrt{(1 + CSF)} \times \sqrt{\frac{E_{pipa} \times I_{pipa}}{M_e \times L_{eff,CF}^4} \times \left(1 + \left(C_2 \times \frac{S_{eff}}{P_{E,CF}} \right) + \left(C_3 \times \left(\frac{\delta_{CF}}{D} \right)^2 \right) \right)}$	Hz	$f_{0,CF}$	1.37
	Onset Reduced Velocity	$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \times \psi_{proxy,onset} \times \psi_{mass,onset} \times \psi_{\alpha,onset}}{\gamma_{on,CF}}$		$V_{R,onset}^{CF}$	2.98
	Screening Check Criteria	$\frac{f_{0,CF}}{\gamma_f} > \frac{U_c + U_w}{V_{R,onset}^{CF} \times D} \times \gamma_{CF}$	1.189120444	>	0.596 COMPLY

Tabel 4.34 Rangkuman Hasil Perhitungan Analisis Dinamis *Free Span*

	Condition		Unit
	In Lined	Cross Flow	
Aktual Span	15.67		Meter
Current Velocity Ratio	1.0000		
Allowable Span	20.2491	19.7933	Meter
Screening Fatigue	NOT COMPLY	COMPLY	

Dari tabel di atas diketahui bahwa hasil *screening fatigue* untuk arah *in-line* menunjukkan keterangan “*not comply*”, sedangkan arah *cross-flow*

menunjukkan tanda “*comply*”. Artinya, untuk arah *in-line*, *free span* tidak memenuhi kriteria respon model yang telah ditentukan oleh DNV-RP-F105 sehingga perlu dilakukan analisis *fatigue*. Selain itu, ***onset reduced velocity*** (V_R) yang dihasilkan dari arah ***in-line*** sebesar **1.16**, telah memasuki *instability zone*, tepatnya pada *zone I*, yaitu ketika ($1.0 < V_R < 2.5$), maka pada daerah ini telah terjadi *vortex sheeding*, sehingga menimbulkan vibrasi pada *free span*. Vibrasi inilah yang menyebabkan salah satu penyebab gagalnya *screening* untuk respon model.

Sedangkan untuk arah *cross-flow*, berdasarkan *screening* model untuk menentukan apakah terjadi *fatigue* atau tidak, nilai yang dihasilkan masih memenuhi kriteria yang telah ditetapkan oleh DNV-RP-F105 sehingga tidak perlu dilakukan analisis *fatigue*. Dan juga, ***onset reduced velocity*** (V_R) yang dihasilkan dari arah ***cross-flow*** yaitu sebesar **2.98**, juga tidak memasuki daerah *instability* ketika bernilai ($3.0 < V_R < 5.0$) dan terjadi *vortex shedding* sehingga tidak menimbulkan vibrasi.

Dari segi *allowable span*, berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, untuk arah ***in-line*** menghasilkan panjang efektif (L_{eff}) sebesar **20.249 m**, sedangkan arah ***cross-flow*** menghasilkan panjang efektif (L_{eff}) sebesar **19.79 m**. Dari hasil analisis kedua arah ini, dapat kita lihat bahwa panjang *span* yang dihasilkan dari arah *cross-flow* digunakan sebagai *allowable span* untuk arah dinamis karena mengambil hasil perhitungan yang terkecil dan juga tidak melebihi dari 20 m yang menjadi desain panjang awal.

Selain dari hasil di atas, untuk melihat apakah terdapat pengaruh pada lokasi *crossing* untuk pipa yang ditinjau, maka penulis juga melakukan analisis untuk *free span* untuk pipa yang sama namun pada daerah yang tidak mengalami. Berikut adalah perbandingan hasil analisis dinamis untuk *free span* yang berada pada daerah *crossing* dan *free span* yang tidak berada pada daerah *crossing*.

Tabel 4.35 Perbandingan Hasil Perhitungan Dinamis antara *Free Span* di Daerah *Crossing* dengan *Free Span* di Daerah *Non-Crossing* untuk Arah *Cross-Flow*

Parameter (Arah Cross-Flow)	<i>Free Span (Crossing)</i>		<i>Free Span (Non-Crossing)</i>	
	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
<i>Dynamic Soil Stiffness</i>	1069712.3	N/m ²	1069712.32	N/m ²
<i>Relative Soil Stiffness</i>	4.1890578		4.18905782	
<i>Efective Span</i>	19.793293	m	19.7932926	m
<i>Submerged Weight</i>	565.48147	N/m	565.481473	N/m
<i>Euler Load</i>	105135.36	N	105135.363	N
<i>Static Deflection</i>	0.087822	m	0.11714894	m
<i>Fundamental Natural Frequency</i>	1.3674885	Hz	1.36799294	Hz
<i>Onset Reduced Velocity</i>	2.9830669		3.27503289	

Tabel diatas menunjukkan bahwa parameter perhitungan antara 2 kondisi diatas itu sama, selain parameter *onset reduced velocity*. Hal ini disebabkan karena dalam perhitungan *onset reduced velocity*, terdapat salah satu variabel dari perhitungan tersebut, yaitu faktor koreksi antara kedekatan jarak antara pipa dengan *seabed* ($\psi_{proxi,onset}$). Dan perbedaan elevasi antara *free span* yang berada di lokasi *crossing* dengan tidak pasti jelas terlihat, dimana jarak antara *free span* dengan *seabed* untuk lokasi *crossing* adalah 0.3 m, sedangkan jarak antara *free span* dengan *seabed* untuk lokasi *non-crossing* adalah 1 m. Hal ini menunjukkan bahwa semakin kecil jarak antara *free span* dengan *seabed*, maka semakin kecil pula *onset reduced velocity* yang terjadi.

Namun, hal ini hanya berlaku pada arah untuk *cross-flow*, sedangkan untuk arah *in-line* tidak berpengaruh karena untuk perhitungan arah ini lebih dipengaruhi oleh faktor parameter stabilitas serta rasio aliran arus.

4.6 Hasil Perhitungan Analisis Kelelahan *Free Span*

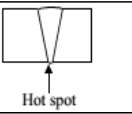
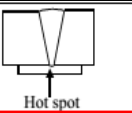
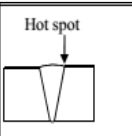
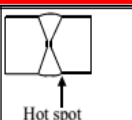
Berdasarkan DNV-RP-F105, analisis *fatigue* dilakukan apabila analisis dinamis *free span* yang telah dikerjakan tidak melebihi *screening* yang ditetapkan oleh *code* tersebut. Dan berdasarkan analisis dinamis yang telah dilakukan, salah satu *screening* yang dilakukan pada *free span* tidak

memenuhi, yaitu pada arah *in-line*. Untuk itu dilakukan analisis *fatigue* untuk mengetahui umur kelelahan *free span* untuk arah *in-line*.

Adapun perhitungan dalam analisis *fatigue* ini adalah faktor koreksi untuk *current flow ratio* maupun *damping*, amplitudo maksimum dari respon VIV, *unit stress amplitude*, *stress range*, dan parameter kurva S-N yang digunakan dalam mencari umur kelelahan, yaitu *fatigue exponent (m)* dan *characteristic fatigue strength constant (log a)*.

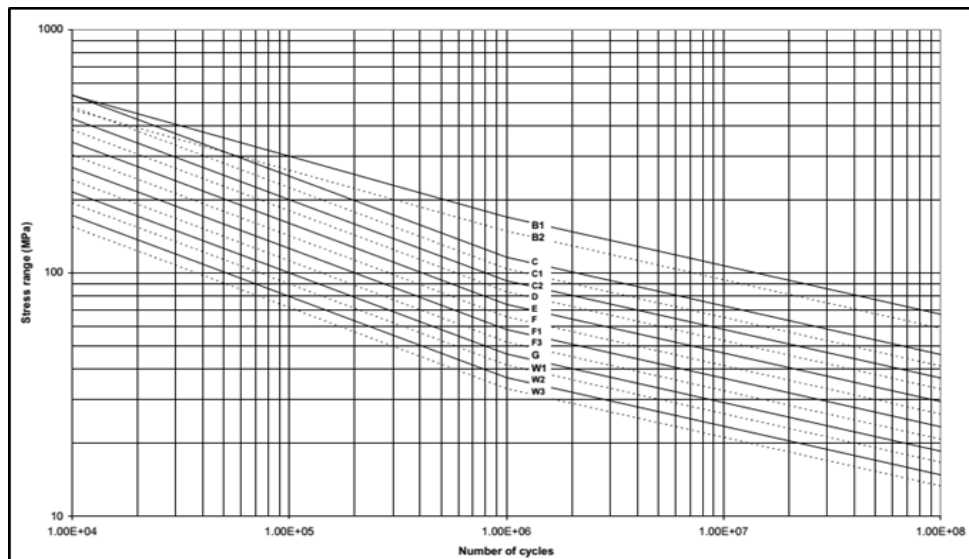
Dalam penentuan *fatigue exponent* dan *characteristic fatigue strength constant* dalam kurva S-N, khusus untuk *riser* dan *pipelines* memiliki pembahasan tersendiri dalam DNV-RP-C203 tahun 2005 mengenai “*Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Unit*”. Hal ini diperlihatkan pada tabel di bawah ini :

Tabel 4.36 Klasifikasi Pengelasan dalam *Pipelines* (DNV-RP-C203)

Penjelasan		Persyaratan Toleransi	Kurva S-N	log a	m
Model Pengelasan	Geometri dan Hot Spot				
Satu sisi (dengan 1 titik <i>hot spot</i>)		$\delta \leq \min(0.15t, 3mm)$	F1	11.299	3
		$\delta > \min(0.15t, 3mm)$	F3	11.146	3
Satu sisi (dengan 2 titik <i>hot spot</i>)		$\delta \leq \min(0.15t, 2mm)$	F	11.455	3
		$\delta > \min(0.15t, 2mm)$	F1	11.299	3
Satu sisi		-	D	11.764	3
Dua sisi		-	D	11.764	3

Perlu diketahui sebelumnya bahwa berdasarkan data awal dari Tugas Akhir ini, penulis tidak diberikan secara spesifik mengenai model pengelasan yang terjadi antara pipa ke pipa. Maka dari itu, penulis mengasumsikan penggunaan salah satu kelas yang ada pada tabel di atas untuk menentukan nilai dari parameter *fatigue exponent (m)* dan *characteristic fatigue strength constant (log a)*, yaitu menggunakan model pengelasan satu sisi yang dalam kurva S-N ditunjukkan dalam kelas D yang memiliki nilai **$\log a = 11.746$**

dengan $m = 3$. Adapun grafik kurva S-N untuk *pipelines* dan *riser* pada air laut dengan *cathodic protection* adalah sebagai berikut.



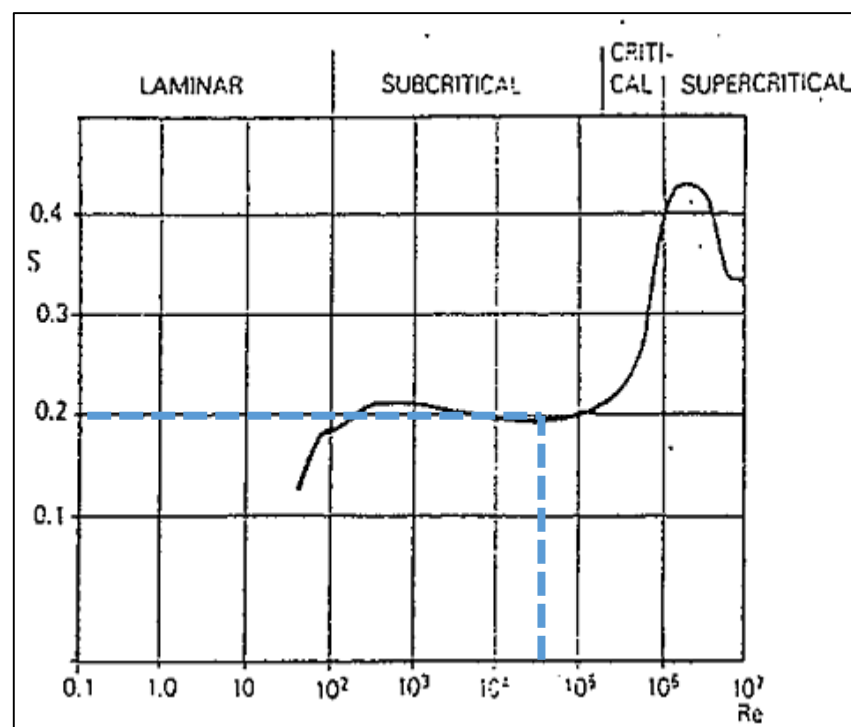
Gambar 4.8 Kurva S-N untuk Kondisi di Laut dengan Proteksi Katodik (*Cathodic Protection*) (DNV-RP-C203)

Selanjutnya, berikut ini adalah *input* yang digunakan dalam mencari umur kelelahan :

Tabel 4.37 Data *Input* untuk Perhitungan Analisis *Fatigue*

Parameter Perhitungan		Nilai	Satuan
Panjang Span Efektif (L_{eff})	=	20.25	m
Current Velocity (U_c)	=	0.3046246	m/s
Wave Velocity (U_w)	=	0.0229148	m/s
CSF (Concrete Stiffness Factor)	=	0.3412039	
Diameter Pipa Baja (D_s)	=	0.1683	m
Diameter Terluar Pipa (D)	=	0.2398	m
Tebal Pipa (t)	=	0.00953	m
Young Modulus (E)	=	$2.07E+11$	N/m^2
Current Flow Ratio (α)	=	0.9300395	Hz
Bilangan Strouhal (S)**	=	0.20	
Safety Factor untuk tegangan (ψ_s)	=	1.05	
Parameter Stabilitas dalam Perancangan (K_{sd})	=	0.1479405	
Koefisien Kondisi Batas (C_4)	=	14.1	
Intensitas Turbulensi (I_c) dalam 30 menit	=	0.05	
Faktor Reduksi dari Turbulensi dan Arah Aliran ($R_{I\phi,1}$)	=	0.6895627	
Faktor Reduksi dari Turbulensi dan Arah Aliran ($R_{I\phi,2}$)	=	0.8823529	
Characteristic Fatigue Strength Constant ($\log a$)	=	11.764	
Fatigue Exponent (m)	=	3	

Seperti yang kita lihat pada tabel di atas, terdapat tanda bintang (**) pada variabel bilangan *strouthal* (S). Hal ini menandakan bahwa bilangan *strouthal* (S) yang digunakan berasal dari DNV (1981) mengenai *Rules of Submarine Pipelines System*. Dimana, bilangan *strouthal* merupakan bilangan frekuensi non-dimensional dari *vortex shedding* dan fungsi dari bilangan *Reynolds*. Sedangkan bilangan *Reynolds* yang didapatkan pada perhitungannya sebesar 6.6465×10^4 . Maka dari itu grafik hubungan bilangan *strouthal* dengan bilangan *Reynolds* yang telah didapatkan adalah sebagai berikut.



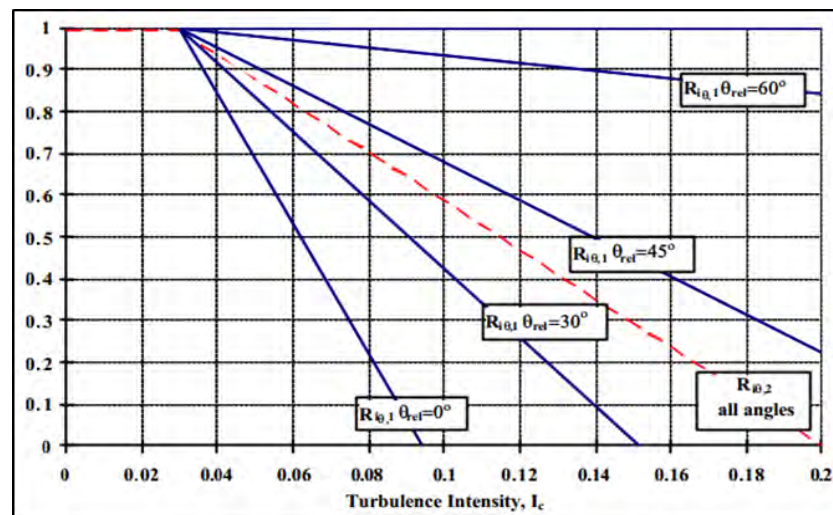
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Bilangan *Reynolds* dengan Bilangan *Strouthal* (DNV-Submarine Pipelines System, 1981)

Untuk nilai faktor reduksi dari turbulensi arah aliran ($R_{I\phi,1}$ dan $R_{I\phi,2}$), didapatkan dari perhitungan berikut ini.

Mencari nilai fungsi reduksi ($R_{I\Phi}$)				
$R_{I\theta,2} = 1.0 - \frac{(I_c - 003)}{0.17} ; 0 \leq R_{I\theta,2} \leq 1$		=	0.882353	
$R_{I\theta,1} = 1 - \pi^2 \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2 \times \theta_{rel}} \right) (I_c - 0.03) ; 0 \leq R_{I\theta,1} \leq 1$				
	θ_{rel}	$R_{I\theta,1}$	Maka :	
	0°	0.689563	$R_{I\theta,1}$	= 0.689563
	30°	2.219786	$R_{I\theta,2}$	= 0.882353
	37.5°	2.400405		
	45°	2.563696		
	60°	2.853626		

Gambar 4.10 Langkah Pengerjaan Nilai Fungsi Reduksi ($R_{I\phi,1}$ dan $R_{I\phi,2}$)

Dari kelima nilai θ_{rel} dan $R_{I\theta,1}$, diambil nilai yang terbesar untuk mencari nilai dari $R_{I\theta,2}$. Sedangkan nilai θ_{rel} didapatkan dari grafik hubungan antara intensitas turbulensi (I_c) dan sudut aliran, seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.11 Grafik Hubungan Intensitas Turbulensi (I_c) dengan Sudut Aliran (DNV-RP-F105, 2002)

Berikut ini adalah tabel hasil perhitungan untuk analisis *fatigue free span* yang telah dilakukan.

Tabel 4.38 Hasil Perhitungan Analisis *Fatigue Free Span*

No.	Parameter Perhitungan	Rumus		Nilai	Satuan
1	Frekuensi dari <i>Vortex Shedding</i>	$f_v = \frac{S(U_w + U_c)}{D}$	=	1.365886017	Hz
2	<i>Unit Stress Amplitude</i>	$A_{IL/CF} = C_4 \times (1 + CSF) \times \frac{D \times (D_s - t) \times E}{L_{eff}^2}$	=	363488952	N/m ²
3	<i>Stress Range</i>	$S_{IL} = 2 \times A_{IL} \times \left(\frac{A_y}{D}\right) \times \psi_{\alpha,IL} \times \gamma_s$	=	83064573.76	N/m ²
4	Faktor Koreksi Untuk <i>Current Flow Ratio</i>	$\psi_{\alpha,IL} = \begin{cases} 0 & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ \frac{\alpha - 0.5}{0.3} & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ 1 & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases}$	=	1	
5	<i>Reduced Velocity*</i>	$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_v \cdot D}$	=	1	
6	Faktor Koreksi Dari <i>Damping</i>	$R_k = \begin{cases} 1 - 0.5K_{sd} & \text{untuk } K_{sd} \geq 4 \\ 3.2K_{sd}^{-1.5} & \text{untuk } K_{sd} < 4 \end{cases}$	=	56.23666509	
7	Amplitudo Maksimum Dari Respon VIV	$\left(\frac{A_{y,1}}{D}\right) = \max\left(0.18\left(1 - \frac{K_{sd}}{1.2}\right)R_{I\theta,1}; \left(\frac{A_{y,2}}{D}\right)\right)$	=	0.10881915	
		$\left(\frac{A_{y,2}}{D}\right) = 0.13\left(1 - \frac{K_{sd}}{1.8}\right)R_{I\theta,2}$	=	0.105278304	
8	Kurva S-N	$S_{sw} = 10^{\left(\frac{\log \frac{1}{a_1} - \log N_{sw}}{m_1}\right)} = 10^{\left(\frac{\log \frac{1}{a_2} - \log N_{sw}}{m_2}\right)}$	=	83.43213042	
9	Damage ratio (Berdasarkan Palmgren-Miner dengan parameter Weibull)	$D = \frac{n_0}{\bar{a}} \cdot \frac{\Delta\sigma_0^m}{(\ln n_0)^{m/h}} \Gamma\left(1 + \frac{m}{h}\right)$	=	1.90119E-08	
10	Umur Lelah	$T_{life} = \frac{T_{exposure}}{D}$	=	1051972532	s
			=	33.35783017	tahun
Note :					
h	=	Weibull parameter, yang didapatkan berdasarkan grafik "long term distribution of stress range" dari Palmgren-Miners, dalam kasus ini mengambil nilai h = 0.5			
n ₀	=	10 ⁸ , di ambil berdasarkan grafik "long term distribution of stress range" dalam Palmgren-Miners			
Δσ ₀	=	merupakan nilai <i>stress range</i> yang didapatkan			
$\Gamma(x+1) \cong \sqrt{2\pi x} \left(\frac{x}{e}\right)^x$	=	$\Gamma\left(\frac{m}{h} + 1\right)$	=	393.0365305	(Stirling Formula)

Berdasarkan tabel perhitungan analisis *fatigue* di atas, dapat kita lihat bahwa perhitungan nilai umur kelelahan yang digunakan sedikit berbeda dengan formulasi yang dikeluarkan oleh DNV-RP-F105. Hal ini disebabkan oleh terbatasnya data lingkungan yang digunakan, dimana dalam formulasi DNV dibutuhkan data kejadian dari beban arus yang rinci sehingga kejadian dari *stress range* yang didapatkan juga bernilai fluktuatif dan dapat dilihat

probabilitas kejadian *stress range* untuk rentang kecepatan arus yang terjadi. Maka dari itu, digunakan formulasi *fatigue* dari Palmgren-Miner yang di refleksikan dalam grafik “*long term distribution of stress range*” dengan basis distribusi Weibull yang ada dalam buku “*Offshore Steel Structure*” karangan A. Almar Naess. Namun disini, nilai h yang menjadi parameter dalam distribusi Weibull diasumsikan menggunakan nilai $h = 0.5$. Untuk nilai dari n_0 sendiri didapatkan dari grafik yang sama dengan didasarkan pada penentuan umur desain dari *pipelines* ini ($T_{exposure}$), yaitu 20 tahun, dimana bernilai $n_0 = 10^8$. Sedangkan $\Delta\sigma_0$ merupakan simbol lain dari *stress range*. Sedangkan nilai dari fungsi gamma (Γ) menggunakan formulasi *strilling* yang berasal dari integral dari formulasi fungsi gamma pada umumnya. Dan jika telusuri secara dalam, baik formulasi yang terdapat pada DNV maupun dalam buku *Offshore Steel Structure*, sebenarnya merupakan rumus yang sama dan dikeluarkan oleh orang yang sama yaitu, *Palmgren-Miner*. Hanya saja, untuk formulasi dalam DNV sudah disesuaikan dengan variabel-variabel yang lebih spesifik dan disesuaikan dengan data lingkungan yang lebih detail pula.

Adapun perhitungan umur *fatigue* (T_{life}) dari *free span* akibat *vortex shedding* untuk arah *in-line* berdasarkan tabel perhitungan di atas adalah **lebih dari 33 tahun** dengan perbandingan kerusakan (*rasio damage*) (D) sebesar 1.901×10^{-8} . Sedangkan dari data awal, desain dari *pipelines* yang sedang di analisis ($T_{exposure}$) adalah **20 tahun**. Maka dalam kasus ini, *fatigue* yang terjadi jauh dari umur desain dari *pipelines* dan tidak perlu dilakukan upaya penanganan (remediasi) tambahan yang membutuhkan biaya tambahan, seperti pemberian *support* tambahan atau pengecilan jarak *gap span* yang terjadi pada lokasi *crossing*.

4.7 Permodelan Aliran Menggunakan ANSYS CFX

4.7.1 Umum

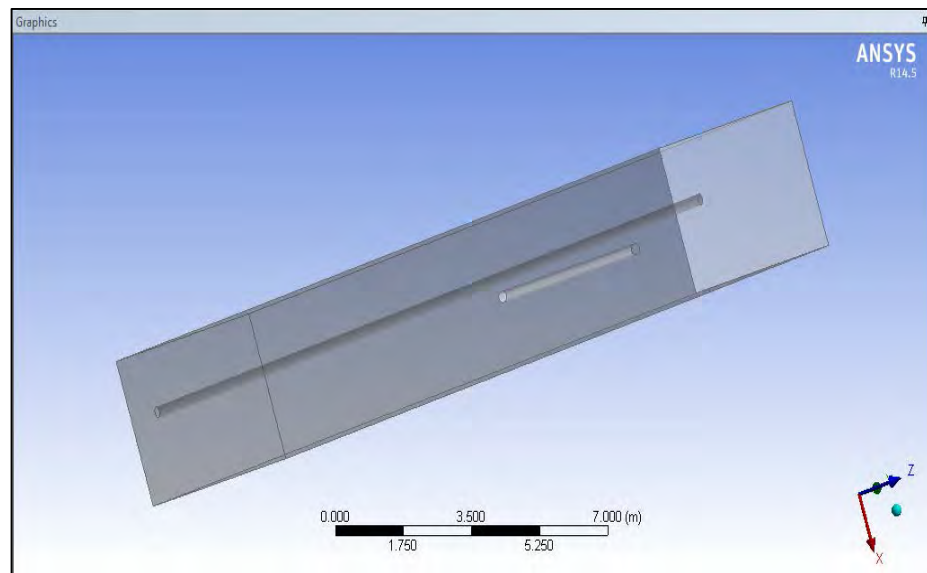
Dalam tugas akhir ini, penulis menggunakan salah satu software bantuan untuk melihat bagaimana aliran fluida yang terjadi pada *free span* yang di tinjau. Software tersebut adalah ANSYS CFX. ANSYS CFX merupakan

salah satu perangkat lunak yang berbasis metode elemen hingga (*grid*) yang dipakai untuk menganalisis mengenai aliran fluida secara numeris atau biasa disebut CFD (*computational fluid dynamic*). Program ini memungkinkan untuk memprediksi fenomena aliran fluida yang jauh lebih kompleks dan akurat.

4.7.2 Langkah Pengerjaan

Adapun langkah-langkah umum pengerjaan ANSYS CFX untuk tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

1. Menggambarkan geometri model permasalahan, dalam hal ini geometri *free span* yang telah diinginkan, menggunakan AutoCAD. Nantinya hasil geometri yang telah dibuat di *convert* ke dalam CFX lalu dilakukan *meshing*. *Meshing* adalah diskritisasi dari elemen dan merupakan bagian terpenting dari ANSYS. Adapun variabel geometri yang digunakan adalah diameter terluar *free span* (D) dan panjang dari *free span*. Dalam kasus ini, nilai panjang dari *free span* adalah 15.67 dengan diameter sebesar 0.2398 m.

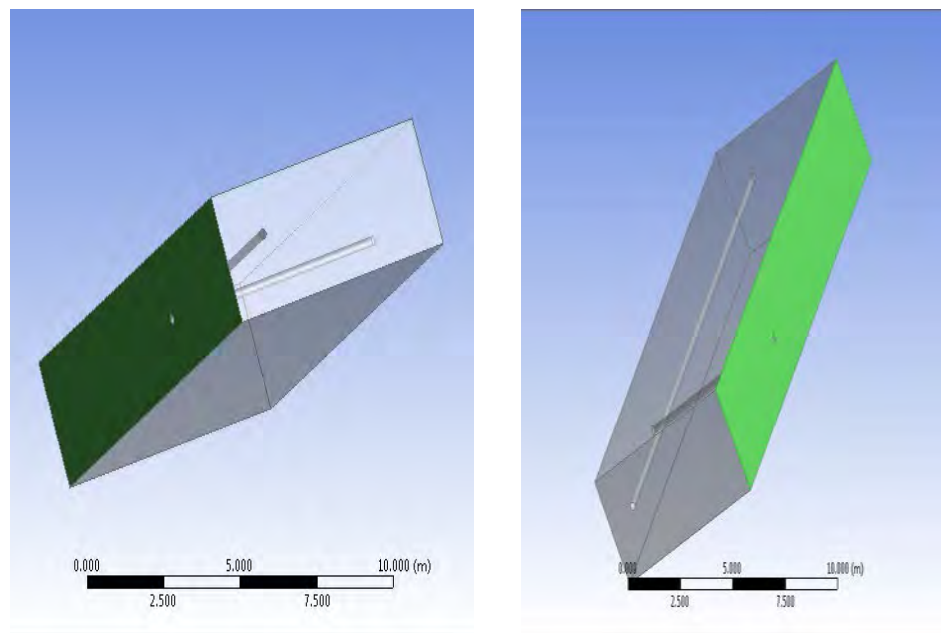


Gambar 4.12 Permodelan Geometri dari *Free Span* yang Berada di Lokasi *Crossing*

Permodelan di atas merupakan hasil dari AutoCAD yang di *convert* ke dalam ANSYS CFX. Untuk balok merupakan domain arus laut, dan

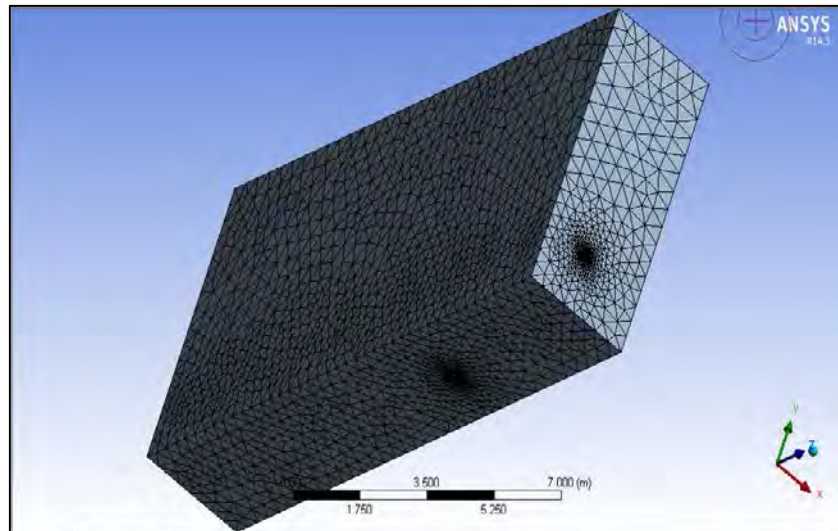
model silinder di merupakan model dari *free span* yang ditinjau. Sedangkan dibawahnya adalah model *pipelines* yang telah ada.

2. Tahapan berikutnya adalah memberikan nama sisi *part* yang dimodelkan. Seperti sisi balok yang digunakan untuk sumber pertama arus mengalir agar diberi nama *inlet* dan akhir arus bergerak diberi nama *outlet*. Sisi balok yang lain diberi nama *wall*. Kemudian untuk struktur bentangan bebas diberi nama pipa 1 dan pipa 2.



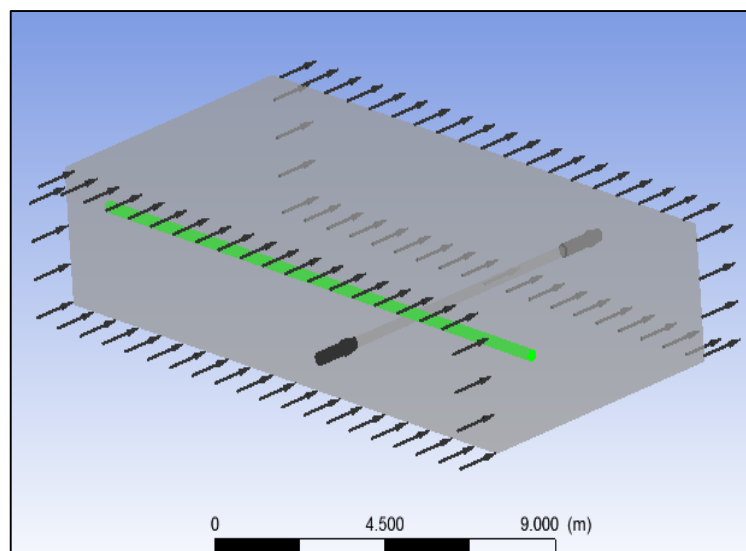
Gambar 4.13 Aliran *Inlet* (Kiri) dan *Outlet* (Kanan) untuk Aliran Arus pada Model Geotemtri

3. Tahapan selanjutnya adalah pemberian *meshing* pada model *free span*. Untuk melihat jumlah elemen (*meshing*) yang terbentuk yaitu dengan cara memasukkan nilai *Max Face Time* kemudian baru di *apply* baru bisa mendapatkan jumlah elemennya. Model *meshing* yang dilakukan dibuat sekecil mungkin. Namun karena keterbatasan dari penulis, maka untuk hanya menggunakan nilai *Max Face Time* yang *default* dari programnya yaitu 0.923450 m dengan jumlah elemen yang dihasilkan sebesar 726466 elemen.



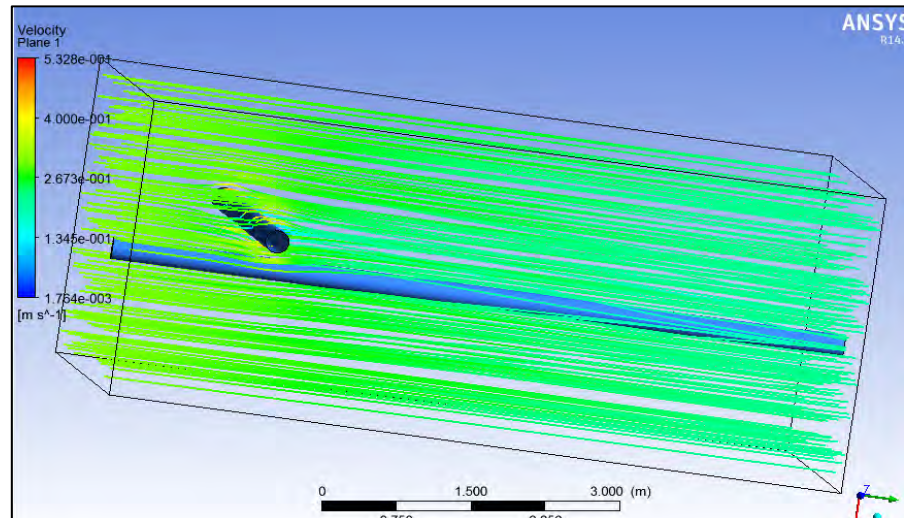
Gambar 4.14 Visualisasi *Meshing* Geometri *Free Span* yang Ditinjau

4. Langkah berikutnya adalah pemberian batas-batas analisis pada model geometri. Untuk kondisi batas *inlet* diberikan nilai kecepatan arus sebesar 0.304625 m/s (sesuai untuk kondisi 100 tahunan), sedangkan *output* diberi luaran *pressure* 0 MPa. Hal ini dimaksudkan untuk melihat *pressure* yang terjadi dalam pipa. Sedangkan untuk sisi-sisi domain yang lain, diberikan *boundary condition* berupa *wall*. Setelah itu file di pindahkan ke ANSYS Solver Manager agar bisa di *running* sesuai denga input yang diinginkan.



Gambar 4.15 Pemberian *Boundary Condition* pada Tiap Part Model

4.7.3 Hasil Permodelan



Gambar 4.16 Hasil *Running* untuk Interaksi antara Aliran Arus dan *Free Span* dengan Kecepatan Sebesar 0.304625 m/s

Pada gambar di atas memperlihatkan bentuk interaksi antara aliran fluida arus yang terjadi di depan dan belakang pipa. Arah aliran yang menabrak *free span* ini berbentuk *streamline* sesuai bentuk geometri pipa. Tetapi untuk daerah dibelakang arus mengalami sedikit *vortex*.

Adapun hasil yang *output* dari CFX sendiri bermacam-macam, beberapa diantaranya adalah nilai beban-beban hidrodinamis seperti *lift force* dan *drag force*. Namun, hasil yang dikeluarkan oleh CFX ini memiliki perbedaan yang cukup signifikan terhadap hasil perhitungan manual yang telah dilakukan. Untuk perhitungan manual, *drag force* (F_D) dan *lift force* (F_L) bernilai didapatkan sebesar **13.6853 N/m** dan **11.404 N/m**, sedangkan hasil perhitungan dari CFX untuk kedua nilai tersebut adalah **65.4712 N/m** untuk (F_D) dan **20.7643 N/m** untuk (F_L). Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh perhitungan yang dilakukan oleh CFX telah mempertimbangkan secara lebih kompleks pengaruh lingkungan di sekitar *free span* yang ditinjau, terutama pada daerah *crossing pipelines* yang terjadi. Selain itu, metode perhitungan serta asumsi-asumsi yang digunakan oleh CFX sendiri cukup berbeda dengan metode perhitungan manual yang dilakukan oleh penulis, sehingga penggunaan permodelan

melalui ANSYS CFX untuk studi kasus ini hanya dilakukan untuk melihat bagaimana pola/bentuk aliran yang mengenai *free span* yang ditinjau.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Merujuk pada hasil perhitungan beberapa analisis dari *free span* pada platform KA-KC yang bersilangan dengan *existing pipelines* KC ke KA di Kilo Field milik Pertamina Hulu Energy Offshore North West Java, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Berdasarkan hasil perhitungan analisis tegangan, didapatkan nilai :
 - a. *hoop stress* sebesar **115.75 MPa**;
 - b. *longitudinal stress* sebesar **7.817 MPa**; dan
 - c. *combined stress (von Mises)* sebesar **116.01 MPa**.

Sedangkan untuk tegangan yang diijinkan (*allowable stress*) berdasarkan ASME B 31.8.2000 mengenai *Gas Transmission and Distributing Piping System* didapatkan nilai :

- a. *hoop stress* sebesar **259.2 MPa**
- b. *longitudinal stress* sebesar **288 MPa**
- c. *combined stress (von Mises)* sebesar **324 MPa**

Jika membandingkan kedua nilai diatas, dapat dilihat bahwa seluruh nilai tegangan yang dicari tidak melebihi nilai kriteria tegangan ijin yang telah ditetapkan sehingga tegangan yang terjadi tidak membuat struktur pipa gagal.

2. Berdasarkan analisis dinamis *free span*, nilai *allowable span* didapatkan dari hasil perhitungan panjang efektif *span* (L_{eff}), yaitu :
 - a. Untuk arah *in-line*, $L_{eff} = 20.25 \text{ m}$
 - b. Untuk arah *cross-flow*, $L_{eff} = 19.79 \text{ m}$

Untuk penetapan nilai panjang *allowable span* yang digunakan, hal ini diambil dari nilai terkecil hasil perhitungan L_{eff} pada analisis dinamis sebelumnya. Dan berdasarkan hasil diatas, maka L_{eff} untuk arah *cross-*

flow, yaitu **19.79 m**, merupakan panjang maksimal *allowable span* yang boleh terjadi di daerah *crossing*. Hasil dari arah ini juga tidak lebih dari 20 m atau masih masuk dalam kriteria yang telah ditentukan sebelumnya.

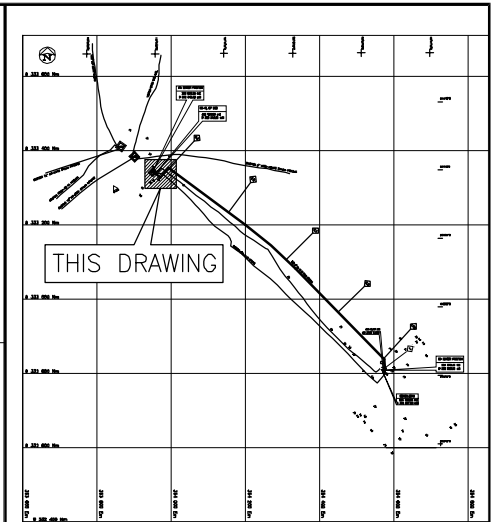
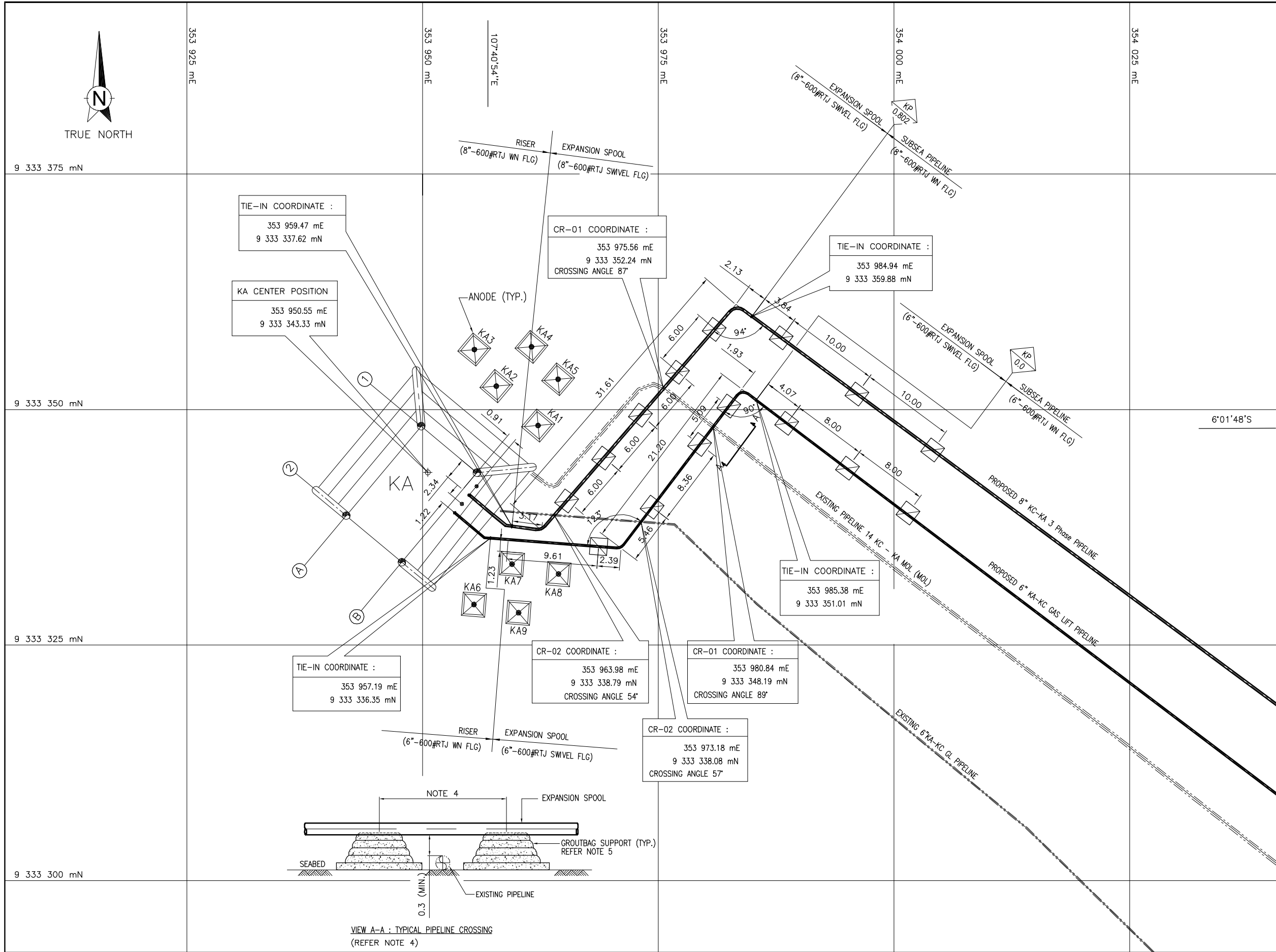
3. Berdasarkan *fatigue analysis* untuk *free span* yang telah dilakukan, didapatkan nilai umur kelelahan (T_{life}) sebesar lebih dari **33 tahun** dengan perbandingan kerusakan (*rasio damage*) yang terjadi (D) adalah **1.901×10^{-8}**

5.2 Saran

Dalam pengerjaan tugas akhir ini, terdapat beberapa kekurangan di dalamnya, sehingga dapat menjadi penelitian lanjutan kedepannya. Adapun saran yang dapat diberikan sebagai masukan dalam penelitian *lanjutan* kedepannya antara lain :

1. Perlu adanya analisis *ultimate limit state* (ULS) dalam kasus ini, untuk mengetahui apakah bentang *span* tersebut harus dilakukan retifikasi atau tidak.
2. Perlu dilakukan validasi perhitungan menggunakan software untuk lebih memastikan hasil perhitungan yang didapat.
3. Perlu adanya perhitungan analisis *fatigue* pada *span* yang lain yang terjadi sepanjang pipa dengan menggunakan data Metaocean yang lebih rinci dengan memperlihatkan persebaran kejadian gelombang dan arus yang mengenai keseluruhan *span* tersebut.
4. Perlu adanya perhitungan dari dimensi *support* untuk tiap *span* yang mengalami kegagalan.

CAD FILE NAME : KILO-KA-M-RIS-5301-REV-0.dwg
OLD DRAWING No. : -



KEY PLAN
NTS

GEODETIC PARAMETERS (NOTE 3)

MAP PROJECTION AND DEFINITIONS
Projection Name : TM Zone 109 SE (BP)
Projection Type : Transverse Mercator (TM)
Grid Units : International Metres
Latitude of Origin : 0° 00' 00" N
Longitude of Origin : 109° 00' 00" E
False Easting : 500 000 m
False Northing : 10 000 000 m
Scale Factor : 0.9996

GEODETIC DATUM AND DEFINITIONS
Coordinate System Name : Genuk
EPSG Coordinate System Code : 4211
Geodetic Datum Name : Genuk
Ellipsoid Name : Bessel 1841
Ellipsoid Semi-major Axis (a) : 6377397.155
Ellipsoid Inverse Flattening (1/f) : 299.1528128


TRANSFORMATION FROM WGS '84
EPSG Geodetic Transformation Name : Genuk *arco-ldn Java
EPSG Geodetic Transformation Code : 41126
EPSG Transformation Method : Geocentric Translation
dX : +378.873 metres
dY : -676.002 metres
dZ : +46.255 metres

VERIFICATION OF TRANSFORMATION COMPUTATION
Test point WGS '84 Coordinates : 5° 22' 30.000" S 106° 57' 30.000" E
Test point Genuk Coordinates : 5° 22' 30.407" S 106° 57' 24.633" E

VERIFICATION OF GEOGRAPHIC TO MAP COORDINATE COMPUTATION
Test point Genuk Coordinates : 5° 22' 30.407" S 106° 57' 24.633" E
Test point Genuk TM 109SE : E 273 619.6 N 9 405 549.8

NOTES

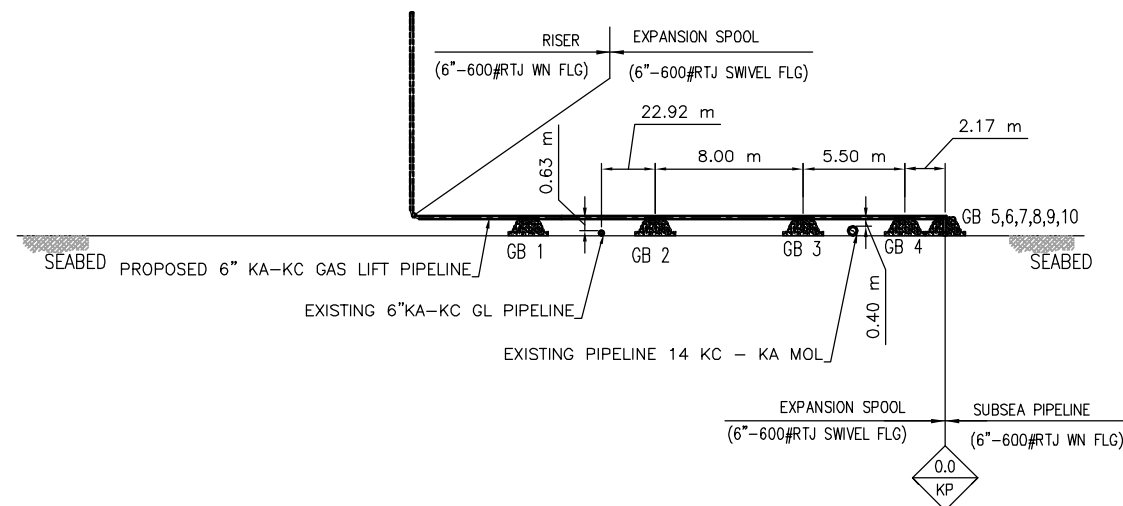
- ALL DIMENSIONS ARE IN METER UNLESS NOTED OTHERWISE.
- COORDINATES ARE SHOWN IN METRE.
- THE DATA BASED ON DOC. REPORT NO EGS-R014007-UNIFORM-PLR-001-1.0 PID361-14" KC-KA MOL/MOL PIPELINE ASSET REPORT
- DETAIL PIPELINE CROSSING IS PRESENTED IN DRAWING BELOW:
 - KILO-KA-M-PLR-5003 PIPELINE CROSSING DETAILS FOR 6" KA-KC GAS LIFT PIPELINE
 - KILO-KC-M-PLR-5003 PIPELINE CROSSING DETAILS FOR 8" KC-KA 3-PHASE PIPELINE
- GROUTBAG SHALL BE USED FOR THE PIPELINE CROSSING. EPCI CONTRACTOR SHALL BE VERIFY AND FINALIZED THE DESIGN & CONFIGURATION OF GROUTBAG BASED ON DESIGN AND INSTALLATION REQUIREMENT. NON-STANDARD SIZE CAN BE CONSIDERED IF NECESSARY.
- THE FLANGE CONNECTION LOCATION BETWEEN EXPANSION SPOOL & SUBSEA PIPELINE SHALL BE FINALIZED BY EPCI CONTRACTOR BASED ON DESIGN AND INSTALLATION REQUIREMENT.

<div>This drawing and the design it covers are the property of PT. PHE ONWJ.</div> <div>It is merely loaned on borrower's expressed agreement that it will not be transmitted, reproduced or disclosed to anyone or otherwise used except privately and then only in a manner stated in the written consent by the lender.</div>	REFERENCE DWG.					CONTRACT NO. STC-0759					WORK ORDER NO. DWE-057			MOC NO. N/A			PROJECT TITLE : KILO FIELD FURTHER DEVELOPMENT PROJECT					
	NO	DRAWING NO	REFERENCE DRAWING			REVISIONS								ENGINEERING APPROVAL		PHE APPROVAL		<div></div>	<div>TITLE</div> <div>PLATFORM APPROACH AT KA PLATFORM</div> <div>8" KC-KA – 3 PHASE PIPELINE</div> <div>AND 6" KA-KC – GAS LIFT PIPELINE</div>			
	1	KILO-KA-M-PLR-5001	PIPELINE ROUTE MAP/LAYOUT FOR												PROJECT	BY	DATE					
			6" KA-KC GAS LIFT												STRUCTURAL							
															PROCESS							
	2	KILO-KC-M-PLR-5001	PIPELINE ROUTE MAP/LAYOUT FOR												MECHANICAL							
			8" KC-KA 3-PHASE											ELECTRICAL				CONTRACTOR APPROVAL				
														INSTRUMENT								
														ARCHITECH								
														FIRE & SAFETY								
						REV	BY	DATE	DESCRIPTION			DRAFT	G	CHECKED	APPROVED	DATE:			SCALE	DRAWING No.	REV.	

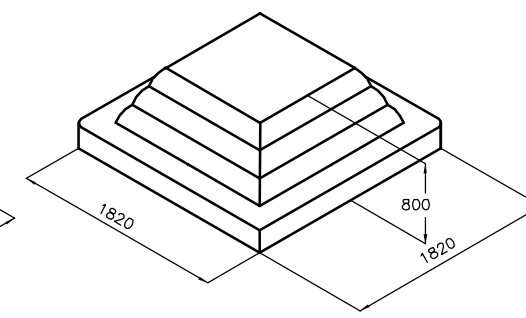
1 : 200

KILO-KA-M-RIS-5301

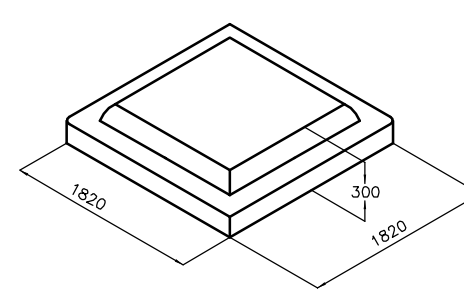
0



PIPELINE CROSSING DATA						
CROSSING No.	Existing P/L Name	KP (Km)	Easting (m)	Northing (m)	Angle at Crossing (minimum)	Status of Existing P/L at Crossing
CR_1	PIPELINE 6" KA-KC MOL	EXPANSION SPOOL	353 972.63	9 333 337.35	47 (deg)	Exposed
CR_2	PIPELINE 14 KC-KA MOL	EXPANSION SPOOL	353 980.84	9 333 348.19	89 (deg)	Exposed

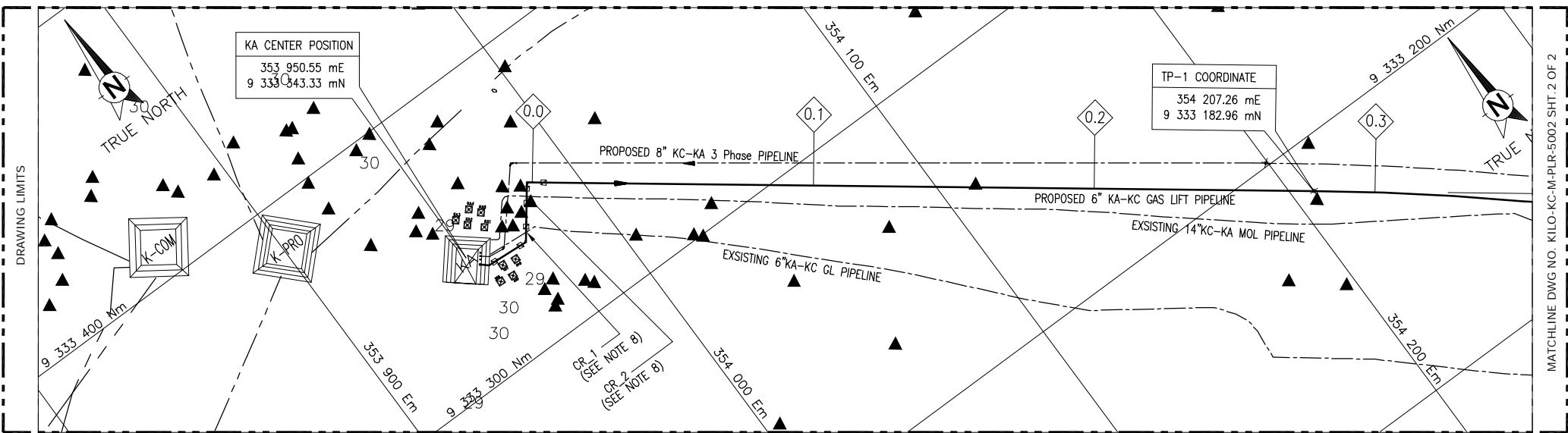


GROUTBAG TYPE 2
SCALE : NTS

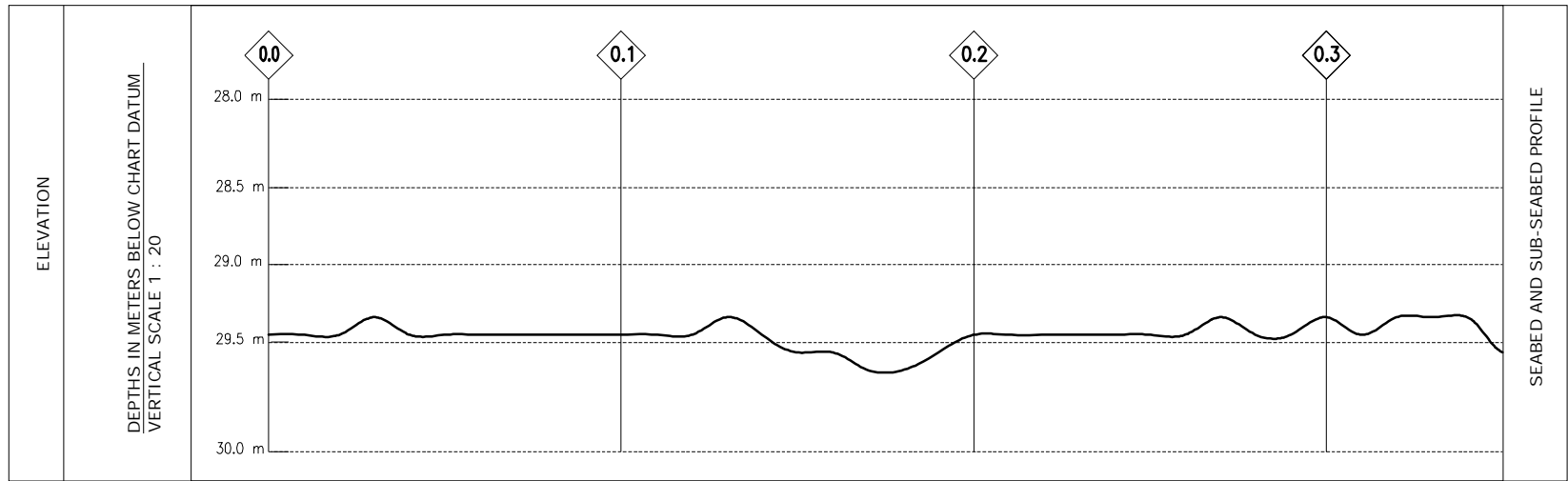


GROUTBAG TYPE 4
SCALE : NTS

1. ALL DIMENSIONS ARE IN MILLIMETER UNLESS NOTED OTHERWISE.
2. COORDINATES ARE SHOWN IN METER.
3. ALLOWABLE SPAN FOR 6" KA-KC GAS LIFT PIPELINE IS 14.0 m AND 9.5 m FOR INSTALLATION AND OPERATING CONDITION RESPECTIVELY. FOR DETAIL, SEE DOC. NO. KIL0-W-CAL-0504
4. GROUTBAG SHALL BE USED FOR THE PIPELINE CROSSING. EPCI CONTRACTOR TO VERIFY AND FINALIZE THE DESIGN & CONFIGURATION OF GROUTBAG BASED ON DESIGN AND INSTALLATION REQUIREMENT. NON-STANDARD SIZE CAN BE CONSIDERED IF NECESSARY.
5. EPCI CONTRACTOR TO ENSURE PIPELINE CAN REST ONTO ALL THE SUPPORTS. IF NECESSARY, SMALL DREDGING TO BE CARRIED OUT IN CASE THE SUPPORT IS TOO HIGH, OR ADDITIONAL GROUTING TO BE PROVIDED IN CASE THERE IS STILL A GAP.
6. ADDITIONAL SUPPORT TO BE PROVIDED BY EPCI CONTRACTOR IF THERE IS STILL FREE SPAN MORE THAN ALLOWABLE.
7. PLATFORM APPROACH OF EXISTING PIPELINES TO BE VERIFIED DURING NEXT ENGINEERING PHASE.



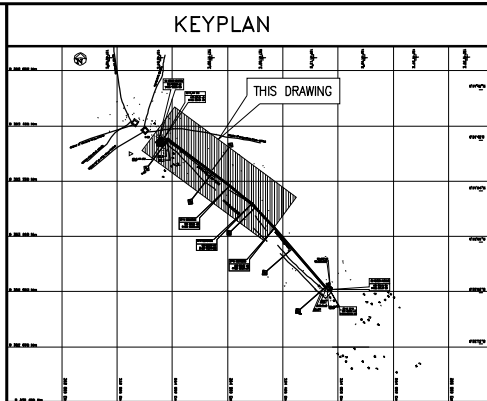
PLAN ON PIPELINE ROUTE
PROPOSED FOR 6" KA-KC 3 PHASE PIPELINE
SCALE 1 : 1000



SEABED PROFILE ALONG PIPELINE ROUTE
HORIZONTAL SCALE 1 : 1000

	KA WELLHEAD EXPANSION SPOOL	SUBSEA PIPELINE	
KILOMETER POINT (PIPELINE ROUTE)	0.0	0.1	0.2
PIPE SIZE AND GRADE	6.625" OD, API 5L-GRADE X52 M0/Q0/N0 PSL 2 CS		
PIPELINE WALL THICKNESS	9.5 mm		
CORROSION COATING THICKNESS AND TYPE	4 mm ASPHALT ENAMEL, 1281.5 kg/m ³		
CONCRETE COATING THICKNESS	38 mm		
WEIGHT OF PIPE	DRY (EMPTY) = 99.7 Kg/m SUB (EMPTY) = 51.4 Kg/m SUB (HYDROTEST) = 71.7 Kg/m SUB (OPERATING) = 54.1 Kg/m SPECIFIC GRAVITY = 2.18 (operating pipeline submerged weight w/ max content density)		
ANODE DETAILS (NOTE 5)	PIPELINE: 16.37 Kg BRACELET ANODE, EVERY 18 PIPE JOINT SPACING RISER: ONE (1) NUMBER OF ANODE, LOCATED AT BOTTOM OF EACH RISER / EXPANSION SPOOL		
PIPELINE ALLOWABLE SPANS (NOTE 4)	INSTALLATION : 14.7 m FLOOD : 14.6 m HYDROTEST : 14.0 m OPERATING : 10.2 m		
TRENCHING/BURIAL REQUIREMENTS	UNBURIED		
FIELD JOINT COATING	HEAT SHRINKABLE SLEEVE WITH DENSITY POLYURETHANE FOAM		
DESIGN/OPERATING PRESSURE TEMPERATURE	DESIGN PRESSURE = 950 Psig HYDROTEST PRESSURE = 1330 Psig OPERATING PRESSURE = 603 Psig MECHANICAL DESIGN TEMPERATURE (METAL) = 200 °F OPERATING TEMPERATURE = 85 °F		
SOIL CHARACTERISTICS	VERY SOFT CLAY		

PIPELINE ENGINEERING DATA



LEGEND

- KA PLATFORM LOCATION :
- EASTING : 353 950.55 m
NORTHING : 9 333 343.33 m
LATITUDE : 6° 01' 48.751" S
LONGITUDE : 107° 40' 48.712" E
- KC PLATFORM LOCATION :
- EASTING : 354 573.42 m
NORTHING : 9 332 808.05 m
LATITUDE : 6° 02' 6.229" S
LONGITUDE : 107° 41' 8.930" E
- NEW SUBSEA PIPELINE
- EXISTING PIPELINE
- ANCHOR SCAR
- BATHYMETRIC CONTOUR AT 1 METRE INTERVAL
- DEBRIS
- JACK-UP
- DROPCORE LOCATION
- PROPOSED PIPELINE ROUTE WITH KP (KILOMETER POST)
- TANGENT POINT
- ANODES

GEODETIC PARAMETERS

MAP PROJECTION AND DEFINITIONS : TM Zone 109 SE (BP)

Projection Name : Transverse Mercator (TM)

Projection Type : International Metres

Grid Units : 0° 00' 00" N

Latitude of Origin : 109° 00' 00" E

Longitude of Origin : 500 000 m

False Easting : 10 000 000 m

False Northing : 0.9996

Scale Factor

GEODETIC DATUM AND DEFINITIONS : Genuk

Coordinate System Name : 4211

EPSG Coordinate System Code : Genuk

Geodetic Datum Name : Bessel 1841

Ellipsoid Name : 6377397.155

Ellipsoid Semi-major Axis (a) : 299.1528128

Ellipsoid Inverse Flattening (1/f)

TRANSFORMATION FROM WGS '84 : Genuk *arco-ldn Java

EPSG Geodetic Transformation Name : 41126

EPSG Geodetic Transformation Code : Geocentric Translation

EPSG Transformation Method : +378.873 metres

dX : -676.002 metres

dY : +46.255 metres

dZ

VERIFICATION OF TRANSFORMATION COMPUTATION

Test point WGS '84 Coordinates : 5° 22' 30.000" S 106° 57' 30.000" E

Test point Genuk Coordinates : 5° 22' 30.407" S 106° 57' 24.633" E

VERIFICATION OF GEOGRAPHIC TO MAP COORDINATE COMPUTATION

Test point Genuk Coordinates : 5° 22' 30.407" S 106° 57' 24.633" E

Test point Genuk TM 109SE : E 273 619.6 N 9 405 549.8

NOTES

- ALL DIMENSIONS ARE IN METER UNLESS NOTED OTHERWISE.
- COORDINATES ARE SHOWN IN METERS.
- THE DATA ARE BASED ON REFERENCE DRAWING (1) AND REFERENCE DRAWING (2)
- ALLOWABLE FREE SPAN REFER TO PIPELINE FREE SPAN CALCULATION PIPELINE DOC. KILO-W-CAL-0404
- ANODE TYPE, NUMBERS & SPACING REFER TO PIPELINE CATHODIC PROTECTION ANALYSIS DOC. KILO-W-CAL-0406
- CUT POINT & LOCATION MAYBE ADJUSTED AS PER SITE CONDITION.
- ANY DEBRIS IN 10 METER RADIUS FROM PROPOSED PIPELINE ROUTE SHALL BE REMOVED.
- REFER TO REF (2) FOR CROSSING COORDINATE.

CAD FILE NAME : KILO-KC-M-PLR-5002-0.dwg
OLD DRAWING No. : -

This drawing and the design it covers are the property of PT. PHE ONWJ. It is merely loaned on borrower's expressed agreement that it will not be transmitted, reproduced or disclosed to anyone or otherwise used except privately and then only in a manner stated in the written consent by the lender.

REFERENCE DWG.		
NO	DRAWING NO	TITLE DRAWING
1	UNIFORM-KC-M-PLR-5001-002	PIPELINE INSPECTION SURVEY PID 361
		14" KC-KA MOL/MOL
2	KILO-KC-M-PLR-5001	PIPELINE ROUTE
		8" KC-KA 3-PHASE PIPELINE

CONTRACT NO. STC-0759					
REVISIONS					
△					
△					
△					
△	KBN	29.11.13	ISSUED FOR APPROVAL	KBN	AP/LR SUT
△	SK	30.10.13	ISSUED FOR REVIEW	KBN	AP/LR SUT
REV	BY	DATE	DESCRIPTION	DRFT'G	CHECKED APPROVED

WORK ORDER NO. DWE-136		

FCP NO. N/A		
ENGINEERING APPROVAL	BY	DATE
PROJECT		
STRUCTURAL		
PROCESS		
MECHANICAL		
ELECTRICAL		
INSTRUMENT		
PIPING		
FIRE & SAFETY		

PHE ONWJ APPROVAL	
DATE: _____	
CONTRACTOR APPROVAL	
DATE: _____	

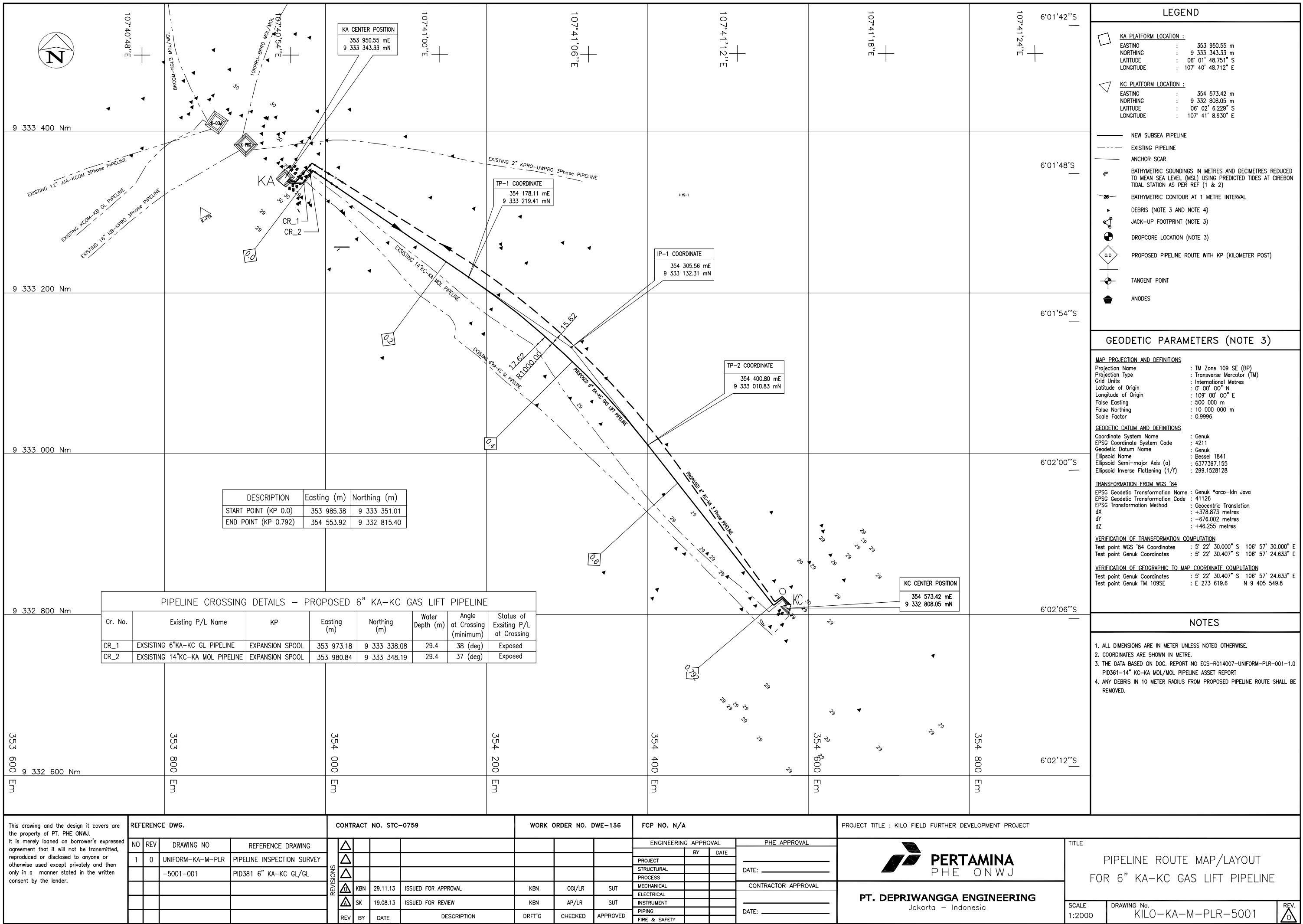
PROJECT TITLE : FEED FOR KILO FIELD FURTHER DEVELOPMENT PROJECT



PT. DEPRIWANGGA
Jakarta - Indonesia

TITLE		
PIPELINE ALIGNMENT SHEET FOR 6" KA-KC GAS LIFT PIPELINE KP 0.0-0.3 (SHEET 1 OF 2)		
SCALE AS SHOWN	DRAWING No. KILO-KA-M-PLR-5002	REV. △

CAD FILE NAME : KILO-KA-M-PLR-5001-0.dwg
OLD DRAWING No. : -



DESCRIPTION	Easting (m)	Northing (m)
START POINT (KP 0.0)	353 985.38	9 333 351.01
END POINT (KP 0.792)	354 553.92	9 332 815.40

PIPELINE CROSSING DETAILS – PROPOSED 6" KA-KC GAS LIFT PIPELINE							
Cr. No.	Existing P/L Name	KP	Easting (m)	Northing (m)	Water Depth (m)	Angle at Crossing (minimum)	Status of Exsiting P/L at Crossing
CR_1	EXSISTING 6"KA-KC GL PIPELINE	EXPANSION SPOOL	353 973.18	9 333 338.08	29.4	38 (deg)	Exposed
CR_2	EXSISTING 14"KA-KA MOL PIPELINE	EXPANSION SPOOL	353 980.84	9 333 348.19	29.4	37 (deg)	Exposed

LEGEND

- KA PLATFORM LOCATION :
 - EASTING : 353 950.55 m
 - NORTHING : 9 333 343.33 m
 - LATITUDE : 06° 01' 48.751" S
 - LONGITUDE : 107° 40' 48.712" E
- KC PLATFORM LOCATION :
 - EASTING : 354 573.42 m
 - NORTHING : 9 332 808.05 m
 - LATITUDE : 06° 02' 6.229" S
 - LONGITUDE : 107° 41' 8.930" E
- NEW SUBSEA PIPELINE
- EXISTING PIPELINE
- ANCHOR SCAR
- BATHYMETRIC SOUNDINGS IN METRES AND DECIMETRES REDUCED TO MEAN SEA LEVEL (MSL) USING PREDICTED TIDES AT CIREBON TIDAL STATION AS PER REF (1 & 2)
- BATHYMETRIC CONTOUR AT 1 METRE INTERVAL
- DEBRIS (NOTE 3 AND NOTE 4)
- JACK-UP FOOTPRINT (NOTE 3)
- DROPCORE LOCATION (NOTE 3)
- PROPOSED PIPELINE ROUTE WITH KP (KILOMETER POST)
- TANGENT POINT
- ANODES

GEODETIC PARAMETERS (NOTE 3)

MAP PROJECTION AND DEFINITIONS

Projection Name : TM Zone 109 SE (8P)
Projection Type : Transverse Mercator (TM)
Grid Units : International Metres
Latitude of Origin : 0° 00' 00" N
Longitude of Origin : 109° 00' 00" E
False Easting : 500 000 m
False Northing : 10 000 000 m
Scale Factor : 0.9996

GEODETIC DATUM AND DEFINITIONS

Coordinate System Name : Genuk
EPSG Coordinate System Code : 4211
Geodetic Datum Name : Genuk
Ellipsoid Name : Bessel 1841
Ellipsoid Semi-major Axis (a) : 6377397.155
Ellipsoid Inverse Flattening (1/f) : 299.1528128

TRANSFORMATION FROM WGS '84

EPSC Geodetic Transformation Name : Genuk *arco-ldn Java
EPSC Geodetic Transformation Code : 41126
EPSC Transformation Method : Geocentric Translation
dX : +378.873 metres
dY : -676.002 metres
dZ : +46.255 metres

VERIFICATION OF TRANSFORMATION COMPUTATION

Test point WGS '84 Coordinates : 5° 22' 30.000" S 106° 57' 30.000" E
Test point Genuk Coordinates : 5° 22' 30.407" S 106° 57' 24.633" E

VERIFICATION OF GEOGRAPHIC TO MAP COORDINATE COMPUTATION

Test point Genuk Coordinates : 5° 22' 30.407" S 106° 57' 24.633" E
Test point Genuk TM 109SE : E 273 619.6 N 9 405 549.8

NOTES

- ALL DIMENSIONS ARE IN METER UNLESS NOTED OTHERWISE.
- COORDINATES ARE SHOWN IN METRE.
- THE DATA BASED ON DOC. REPORT NO EGS-R014007-UNIFORM-PLR-001-1.0 PID361-14" KC-KA MOL/MOL PIPELINE ASSET REPORT
- ANY DEBRIS IN 10 METER RADIUS FROM PROPOSED PIPELINE ROUTE SHALL BE REMOVED.

This drawing and the design it covers are the property of PT. PHE ONWJ. It is merely loaned on borrower's expressed agreement that it will not be transmitted, reproduced or disclosed to anyone or otherwise used except privately and then only in a manner stated in the written consent by the lender.

REFERENCE DWG.			
NO	REV	DRAWING NO	REFERENCE DRAWING
1	0	UNIFORM-KA-M-PLR-5001-001	PIPELINE INSPECTION SURVEY PID381 6" KA-KC GL/GL

CONTRACT NO. STC-0759				WORK ORDER NO. DWE-136			FCP NO. N/A		
REVISIONS	△								
	△								
	△								
	△	KBN	29.11.13	ISSUED FOR APPROVAL	KBN	OGI/LR	SUT		
	△	SK	19.08.13	ISSUED FOR REVIEW	KBN	AP/LR	SUT		
REV	BY	DATE	DESCRIPTION		DRFT'G	CHECKED	APPROVED		

ENGINEERING APPROVAL			PHE APPROVAL		
	BY	DATE			
PROJECT					
STRUCTURAL					
PROCESS					
MECHANICAL					
ELECTRICAL					
INSTRUMENT					
PIPING					
FIRE & SAFETY					

PROJECT TITLE : KILO FIELD FURTHER DEVELOPMENT PROJECT

PT. DEPRIWANGGA ENGINEERING
Jakarta – Indonesia

TITLE
PIPELINE ROUTE MAP/LAYOUT
FOR 6" KA-KC GAS LIFT PIPELINE

SCALE
1:2000

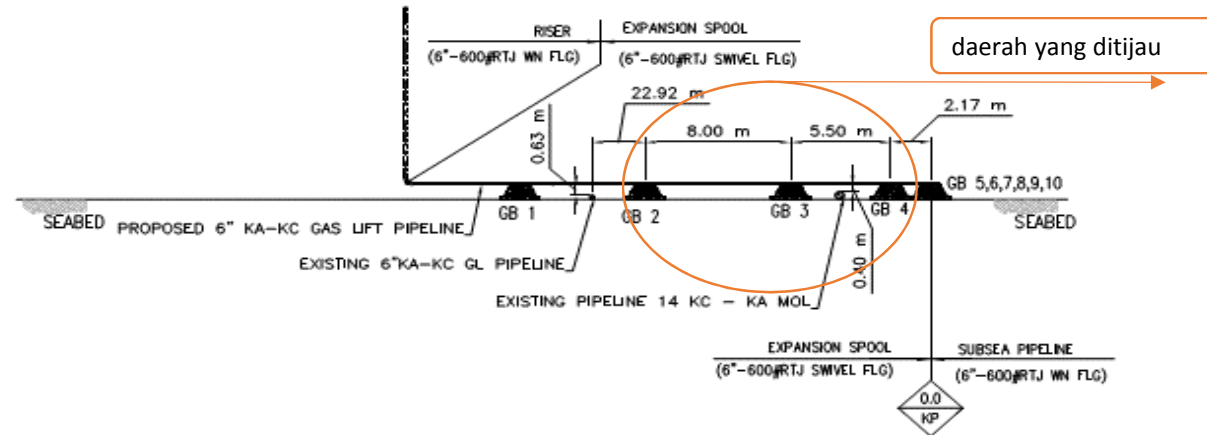
DRAWING No.
KILO-KA-M-PLR-5001

REV.
△

PERHITUNGAN KECEPATAN ARUS

Data Kecepatan Arus

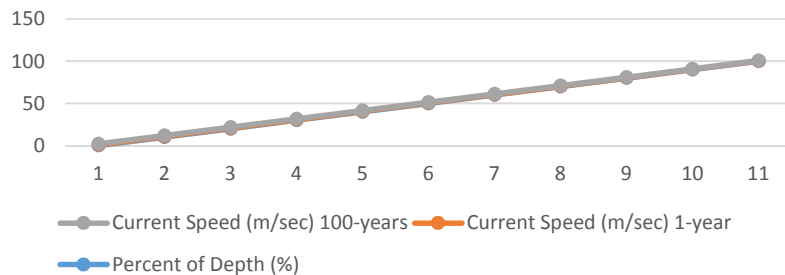
Percent of Depth (%)	Current Speed (m/sec)	
	1-year	100-years
0	0.914	1.219
10	0.853	1.128
20	0.792	1.036
30	0.732	0.975
40	0.671	0.884
50	0.61	0.792
60	0.549	0.732
70	0.488	0.671
80	0.427	0.61
90	0.366	0.518
100	0.244	0.305



note : untuk analisa dinamis pada freespan, digunakan kecepatan 100 tahunan

*untuk kedalaman pipa sebenarnya adalah : kedalaman laut (d) - (tinggi ground bag + jari" luar pipa) = 29,87 - (1 m + 0.1199) m = 29.87 - 1.1199 = 28.7501 m

Grafik Perbandingan Kecepatan Arus dengan Persentase Kedalaman



Untuk mencari kecepatan arus yang mengenai tepat pada ketinggian pipa sebenarnya yang di topang oleh ground bag, digunakan rumus interpolasi. Berdasarkan grafik di samping, hubungan antara kecepatan arus (U_c) dengan persentase kedalaman (d) adalah linier. Maka rumus interpolasi yang digunakan adalah rumus interpolasi linier, yaitu sebagai berikut :

$$y_2 = \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} + y_1 \quad (\text{interpolasi linier})$$

diketahui :

$$X_1 = 0.9$$

$$X_2 = \text{kedalaman pipa : kedalaman laut (d)} = 0.9625$$

$$X_3 = 1$$

$$y_1 = 0.518$$

$$y_2 = \dots ?$$

$$y_3 = 0.305$$

penyelesaian :

$$y_2 = \frac{(x_2 - x_1)(y_3 - y_1)}{(x_3 - x_1)} + y_1 = 0.384875$$

Berdasarkan perhitungan diatas, didapatkan kecepatan arus pada kedalaman pipa 28.7501 m yaitu 0.384875 m/s. Perlu diketahui, bahwa nilai kecepatan ini masih berupa nilai kecepatan arus pada kedalaman 28.7501 m, yang berarti bahwa kecepatan ini merupakan kecepatan yang dihitung berdasarkan *outer zone*, sedangkan aliran arus yang besar pengaruhnya terhadap *free span* adalah aliran pada *inner zone*. Dan kecepatan pada *inner zone* ini telah mempertimbangkan tingkat kekasaran dari *seabed*. Maka dari itu, kecepatan pada *inner zone* adalah sebagai berikut :

$$U(z) = U(z_r) \cdot R_c \cdot \frac{(\ln(z) - \ln(z_0))}{(\ln(z_r) - \ln(z_0))} = 3.05E-01 \text{ m/s}$$

keterangan :

$$U(z) : \text{kecepatan arus yang dihitung dari atas seabed hingga ke permukaan free span (m/s)} = 0.304624631 \text{ m/s}$$

$$U(z_r) : \text{kecepatan arus yang dihitung dari atas seabed hingga ke permukaan free span (m/s)} = 0.384875 \text{ m/s}$$

$$Z_o : \text{parameter kekasaran seabed (m)} = 5.00E-06 \text{ m}$$

$$Z_r : \text{ketinggian yang dihitung dari permukaan air hingga ke permukaan free span (m)} = 28.7501 \text{ m}$$

$$z : \text{ketinggian di atas seabed hingga permukaan pipa (m)} = 1.1199 \text{ m}$$

$$R_c : \text{reduction factor : } R_c = \sin(\theta_{rel}) = 1$$

$$\theta_{rel} : \text{sudut datang arus terhadap freespan} = 90^\circ$$

Maka dari itu, didapatkan kecepatan partikel arus sebesar 0.3046246 m/s

Tabel Parameter Kekasaran Seabed (DnV RP-F-105, 2002)

Tipe Tanah	Kekasaran Z_o (m)
Silt and clay	$5 \cdot 10^{-6}$
Fine sand	$1 \cdot 10^{-5}$
Medium sand	$4 \cdot 10^{-5}$
Coarse sand	$1 \cdot 10^{-4}$
Gravel	$3 \cdot 10^{-4}$
Pebbel	$2 \cdot 10^{-3}$
Cobble	$1 \cdot 10^{-2}$
Boulder	$4 \cdot 10^{-2}$

Menghitung Panjang *Allowable Span* (Static)

Untuk nilai panjang *span* yang diijinkan untuk kondisi statik bertujuan untuk digunakan sebagai nilai initial panjang span untuk perhitungan freespan untuk kondisi dinamis (dynamic analysis). Adapun rumus panjang *allowable span* untuk kondisi statik adalah sebagai berikut :

$$L_{st} = \sqrt{\frac{2 \cdot C \cdot I \cdot \sigma_e}{W_t \cdot D}}$$

Keterangan :

- L_{st} : panjang *freespan* statik yang diijinkan (m)
- C : konstanta ujung peletakan
- I : momen inerti penampang pipa (m^4)
- σ_e : tegangan ekuivalen (von mises stress) (N/m^2)
- W_t : berat pipa terdistribusi merata per satuan panjang (N)
- D_{tot} : diameter total terluar pipa

Dimana untuk nilai W_t dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$W_t = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2}$$

Keterangan :

- W_{sub} : berat pipa terendam dalam air per satuan panjang (*submerged weight*)
- F_D : gaya drag (N/m)
- F_I : gaya inerti (N/m)

Berikut ini merupakan data awal yang digunakan untuk melakukan perhitungan tegangan hingga mendapatkan nilai panjang *allowable span* untuk kondisi statik.

Parameter	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan	Nilai	Satuan
Diameter pipa (OD)	6.62598425	in	168.3	mm	0.1683	m
Ketebalan Pipa (t)	0.37519685	in	9.53	mm	0.00953	m
<i>Max Capacity</i>	700 BPOD					
<i>Hydrotest Pressure</i>	1334.35	psi	9.2	MPa	9200000	N/m^2
<i>Design Pressure</i>	942.75	psi	6.5	MPa	6500000	N/m^2
<i>Operating Pressure</i>	603.36	psi	4.16	MPa	4160000	N/m^2
<i>Mechanical Design Temp.</i>	200	°F	93.3	°C		
<i>Operating Temperature (T)</i>	85	°F	29.44	°C		
<i>Installation Temperature (T₀)</i>	105	°F	40.55	°C		
Massa Jenis Gas	38.48	lb/ft ³	616.3904562	kg/m ³		
Kelas Material Pipa	API 5L Grade X52MO or X52QO PSL2 CS					
SMTS	66.72	ksi	460	MPa	460000000	N/m^2
SMYS	52.21	ksi	360	MPa	360000000	N/m^2
Fluida Isi	Gas					
<i>Modulus Young (E)</i>	30022.80	ksi	207000	MPa	2.07E+11	N/m^2
<i>Rasio Poisson (v)</i>	0.3		0.3			
Massa Jenis Pipa	490.06	lb/ft ³	7850	kg/m ³		
Koefisien Ekspansi Termal (α)	0.0000211	in/in °F	0.0000117	/°C		

Berikut ini merupakan *screening criteria* dan perhitungan tegangan pipa hingga mendapatkan tegangan *von mises* berdasarkan ASME 3.18.2000 .

Parameter Perhitungan	Rumus	Nilai	Satuan
<i>Internal Pressure</i>	$P_i = \frac{(2 \cdot SMYS \cdot t)}{D} F \cdot E \cdot T$	= 2.29E+07	N/m ²
Tegangan Hoop (σ_h)	$\sigma_h = P_i \frac{D}{2t}$	= 1.16E+08	N/m ²
Tegangan <i>Poisson</i> (σ_p)	$\sigma_p = \nu \sigma_h$	= 3.47E+07	N/m ²
Tegangan Ekspansi Termal (σ_T)	$\sigma_T = -E\alpha (T - T_0)$	= 2.69E+07	N/m ²
Tegangan Longitudinal (σ_L)	$\sigma_L = \sigma_p - \sigma_T$	= 7.82E+06	N/m ²
Tegangan Ekvivalen (σ_E)	$\sigma_E = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_L^2}$	= 1.16E+08	N/m ²
Momen Inertia Penampang Pipa (I_{pipa})	$I_{pipa} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{pipa}))^4)$	= 0.000015	m ⁴
Gaya Drag (F_D)	$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	= 13.6853	N/m
Gaya Inertia (F_I)	$F_I = C_M \times \frac{\pi D^2}{4} \times \rho_{seawater} \times \frac{dU}{dt}$	= 4.3352	N/m
Berat Pipa yang Terendam (W_{sub})	$W_{sub} = W_{pipa} + W_{coat} + W_{concrete} + W_{fluida} - W_{bouy}$	= 565.48	N/m
Berat Pipa Terdistribusi merata (W_{sub})	$W_t = \sqrt{W_{sub}^2 + (F_D + F_I)^2}$	= 565.77	N/m
Panjang Allowable Span Static (L_{st})	$L_{st} = \sqrt{\frac{2 \cdot C \cdot I \cdot \sigma_e}{W_t \cdot D}}$	= 15.67	m

Note :

C_M	: koefisien <i>added mass</i>	= 2	(berdasarkan DnV 1981 tentang <i>Pipelines Design Guidelines</i>)
C_I	: koefisien <i>inertia</i>	= $C_M + 1$	= 3
dU/dt	: percepatan horizontal aliran (m/s ²)	= $\dot{u} = \omega^2 a e^{kz} \cos(\omega t - kx)$	= 0.0312033 m ²
C	: konstanta ujung peletakan	= 9.87	Untuk kondisi <i>pinned-pinned</i> (berdasarkan DnV RP F 101)
D	: diameter terluar pipa (m)	= 0.2398	
E	: <i>longitudinal joint factor</i>	= 1	(berdasarkan ASME B 31.8.2000) untuk kelas material pipa API 5L
T	: <i>temperature Derating Factor</i> untuk kondisi suhu kurang dari 250°	= 1	(berdasarkan ASME B 31.8.2000) untuk kelas material pipa API 5L
F	: faktor desain untuk riser dan pipelines	= 0.8	(berdasarkan ASME B 31.8.2000) untuk kelas material pipa API 5L

Tegangan Ijin untuk Kondisi Operasi

Criteria	Allowable	MPa	N/m ²	Result Calculation		Ket.
				MPa	N/m ²	
Hoop Stress	72% SMYS	259.2	259200000	115.7481637	115748163.69	Pass
Longitudinal Stress	80% SMYS	288	288000000	7.817140108	7817140.11	Pass
Combined Stress	90% SMYS	324	324000000	116.0118316	116011831.63	Pass

Berarti didapatkan panjang span statik yang diijinkan sebesar **15.67 m**

CROSS AREA CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
External Pipe Diameter	$D = OD + (2 \times t_{coat}) + (2 \times t_{concrete})$	M	D	0.2398
Internal Cross Section Area	$A_i = \frac{\pi}{4} \times (OD - (2 \times t_{pipa}))^2$	M ²	A_i	0.0175
Steel Pipe Cross Section Area	$A_{pipa} = (\frac{\pi}{4} \times OD^2) - A_i$	M ²	A_{pipa}	0.0048
Coating Layer Cross Section Area	$A_{coat} = (\frac{\pi}{4} \times (OD + (2 \times t_{coat}))^2) - A_i - A_{pipa}$	M ²	A_{coat}	0.0022
Concrete Cross Section Area	$A_{concrete} = (\frac{\pi}{4} \times (OD + (2 \times t_{coat}) + (2 \times t_{coat}))^2) - A_i - A_{pipa} - A_{coat}$	M ²	A_{concrete}	0.0208

MASS CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Mass of Fluida	$M_{fluida} = A_i \times \rho_{fluida}$	Kg/M	M_{fluida}	0.6737
Mass of Pipe	$M_{pipa} = A_{pipa} \times \rho_{pipa}$	Kg/M	M_{pipa}	37.3298
Mass of Coating	$M_{coat} = A_{coat} \times \rho_{coat}$	Kg/M	M_{coat}	2.7758
Mass of Concrete	$M_{concrete} = A_{coacrete} \times \rho_{concrete}$	Kg/M	$M_{concrete}$	63.1947
Mass Struktur	$M_{struktur} = M_{pipa} + M_{coat} + M_{concrete}$	Kg/M	$M_{struktur}$	103.3003
Mass of Disposal Water/Bouyancy	$M_{bouy} = \frac{\pi}{4} \times ID^2 \times \rho_{seawater}$	Kg/M	M_{bouy}	46.3113
Added Mass Coeficient	$C_a = \begin{cases} 0.68 + \left(\frac{1.6}{1 + \left(5 \times \frac{e}{D} \right)} \right) & ; \text{ untuk } e/D < 0.8 \\ 1 & ; \text{ untuk } e/D \geq 0.8 \end{cases}$		C_a	1.0000
Added Mass	$M_a = C_a \times M_{bouy}$	Kg/M	M_a	46.3113
Effective Mass	$M_e = M_{fluida} + M_{struktur} + M_a$	Kg/M	M_e	150.2853
Specific Mass Ratio	$M_{ratio} = \frac{M_{struktur}}{M_{bouy}}$		M_{ratio}	2.2306

WEIGHT CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Pipe weight per meter	$W_{pipa} = M_{pipa} \times 9.8067$	N/M	W_{pipa}	366.0821
Coating weight per meter	$W_{coat} = M_{coat} \times 9.8067$	N/M	W_{coat}	27.2215
Concrete weight per meter	$W_{concrete} = M_{concrete} \times 9.8067$	N/M	$W_{concrete}$	619.732
Fluida Weight per Meter	$W_{fluida} = M_{fluida} \times 9.8067$	N/M	W_{fluida}	6.6072
Bouyance force per meter	$W_{bouy} = M_{bouy} \times 9.8067$	N/M	W_{bouy}	454.1609

CONCRETE STIFFNESS CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Moment Inersia of Pipe	$I_{pipa} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{pipa}))^4)$	M ⁴	I_{pipa}	0.000015
Moment Inersia of Concrete	$I_{concrete} = \frac{\pi}{64} \times (OD^4 - (OD - (2 \times t_{concrete}))^4)$	M ⁴	$I_{concrete}$	0.000115
Concrete Stiffness Enhancement Factor	$CFS = 0.25 \times \left(\frac{E_{concrete} \times I_{concrete}}{E_{pipa} \times I_{pipa}} \right)^{0.75}$		CFS	0.341204

HYDRODYNAMIC CALCULATION		RUMUS	SATUAN	SYMBOL	VALUE
Reynould Number (Re)		Drag Force Coefficient		C_D	1.2
$R_e = \frac{U \times D}{\nu}$	64645.12076				
$\nu = 1.13 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{s}$ atau $1.14856^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$					
Keulegan - Carpenter Number (KC)		Lift Force Coefficient		C_L	1
$KC = \frac{U_w}{f_w \times D}$	0.082379157				
Current Flow Ratio		$\alpha = \frac{U_c}{U_W + U_C}$		α	1.00000
Drag Force		$F_D = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	N/M	F_D	13.6853
Lift Force		$F_L = C_L \times \frac{1}{2} \times \rho_{seawater} \times D \times U^2$	N/M	F_L	11.4044
Effective Axial Force		$S_{eff} = H_{eff} - \Delta p_i A_i (1 - 2\nu) - A_{pipa} E \Delta T \alpha_e$	N/M	S_{eff}	-226119.81

OTHER CALCULATION	RUMUS	SATUAN	SYMBOL
Total Damping Ratio	$\zeta_T = \zeta_{soil} + \zeta_{str} + \zeta_h$		ζ_T
Stability Parameters	$K_s = \frac{4 \times \pi \times M_e \times \zeta_T}{\rho_{seawater} \times D^2}$		K_s
Stability Parameters Factor	$K_{sd} = \frac{K_s}{\gamma_k}$		K_{sd}
Seabed Correction Factor	$\psi_{proxionset} = \begin{cases} \frac{1}{4} \times \left(3 + \left(1.25 \times \frac{e}{D} \right) \right) ; & \text{untuk } \frac{e}{D} < 0.8 \\ 1 & ; \text{untuk } \frac{e}{D} \geq 0.8 \end{cases}$		$\gamma_{proxionset}$
Mass Correction Factor	$\psi_{mass,onset} = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \times M_{ratio} ; & \text{untuk } M_{ratio} < 1.5 \\ 1 & ; \text{untuk } M_{ratio} \geq 1.5 \end{cases}$		$\gamma_{mass,onset}$
Current Correction Factor	$\psi_{\alpha,onset} = \begin{cases} 1 + \frac{\alpha}{3} ; & \text{untuk } \alpha < 1.5 \\ 1.167 ; & \text{untuk } \alpha \geq 1.5 \end{cases}$		$\gamma_{\alpha,onset}$

IN-LINE MOTION	IN-LINE CALCULATION	RUMUS		SATUAN	SYMBOL	VALUE
	Dynamic Soil Stiffness	$K_L = C_L \times \left(\frac{2}{3} \times M_{ratio} + \frac{1}{3}\right) \times \sqrt{D}$		N/M ²	K_L	713141.55
	Relative Soil Stiffness Parameter	$\beta_L = {}^{10}\log\left(\frac{K_L \times L^4}{(1 + CSF) \times E_{pipa} \times I_{pipa}}\right)$			β_L	4.01
	Effective Span	$L_{eff,IL} = L \times \begin{cases} \frac{4.73}{(-0.066 \times \beta_L^2) + (1.02 \times \beta_L) + 0.63} & ; \quad \text{untuk } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{(0.036 \times \beta_L^2) + (0.61 \times \beta_L) + 1} & ; \quad \text{untuk } \beta < 2.7 \end{cases}$		M	L_{eff,IL}	20.25
	Hydrodynamic Total Force	$F_{tot} = F_D + F_L$		N/M	F_{tot}	25.09
	Euler Load	$P_{E,IL} = (1 + CSF) \times \frac{\pi^2 \times E_{pipa} \times I_{pipa}}{L_{eff,IL}^2}$		N	P_{E,IL}	100455.62
	Static Deflection	$\delta_{IL} = C_6 \times \frac{F_{tot} \times L_{eff,IL}^4}{E_{pipa} \times I_{pipa} \times (1 + CSF)} \times \frac{1}{\left(1 + C_2 \times \frac{S_{eff}}{P_{E,IL}}\right)}$		M	δ_{IL}	0.0060194
	Fundamental Natural Frequency	$f_{0,IL} = C_1 \times \sqrt{(1 + CSF)} \times \sqrt{\frac{E_{pipa} \times I_{pipa}}{M_e \times L_{eff,IL}^4} \times \left(1 + \left(C_2 \times \frac{S_{eff}}{P_{E,IL}}\right) + \left(C_3 \times \left(\frac{\delta_{IL}}{D}\right)^2\right)\right)}$		Hz	f_{o,IL}	0.96
	Onset Reduced Velocity	$V_{R,onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{on,IL}} & ; \quad \text{untuk } K_{sd} < 0.4 \\ \frac{0.6 + K_{sd}}{\gamma_{on,IL}} & ; \quad \text{untuk } 0.4 < K_{sd} < 1.6 \\ \frac{2.2}{\gamma_{on,IL}} & ; \quad K_{sd} > 1.6 \end{cases}$			V_{R,onset}^{IL}	0.91
	Screening Check Criteria	$\frac{f_{o,IL}}{\gamma_f} > \frac{U_{c,100yr}}{V_{R,onset}^{IL} \times D} \times \left(1 - \frac{L/D}{250}\right) \times \frac{\gamma_{IL}}{\alpha}$	0.832924	>	1.276	NOT COMPLY

CROSS-FLOW MOTION	CROSS-FLOW CALCULATION	RUMUS		SATUAN	SYMBOL	VALUE
	Dynamic Soil Stiffness	$K_V = C_v \times \left(\frac{2}{3} \times M_{ratio} + \frac{1}{3}\right) \times \sqrt{D}$		N/M ²	K _V	1069712.32
	Relative Soil Stiffness Parameter	$\beta_V = {}^{10}\log\left(\frac{K_v \times L^4}{(1 + CSF) \times E_{pipa} \times I_{pipa}}\right)$			β _V	4.19
	Effective Span	$L_{eff,CF} = L \times \begin{cases} \frac{4.73}{(-0.066 \times \beta_V^2) + (1.02 \times \beta_V) + 0.63} & ; \text{ untuk } \beta \geq 2.7 \\ \frac{4.73}{(0.036 \times \beta_V^2) + (0.61 \times \beta_V) + 1} & ; \text{ untuk } \beta < 2.7 \end{cases}$		M	L _{eff,CF}	19.79
	Submerged Weight	$q = W_{pipa} + W_{coat} + W_{concrete} + W_{fluida} - W_{bouy}$		N/M	q	565.48
	Euler Load	$P_{E,CF} = (1 + CSF) \times \frac{\pi^2 \times E_{pipa} \times I_{pipa}}{L_{eff,CF}^2}$		N	P _{E,CF}	105135.36
	Static Deflection	$\delta_{CF} = C_6 \times \frac{q \times L_{eff,CF}^4}{E_{pipa} \times I_{pipa} \times (1 + CSF)} \times \frac{1}{\left(1 + C_2 \times \frac{S_{eff}}{P_{E,CF}}\right)}$		M	δ _{CF}	0.11715
	Fundamental Natural Frequency	$f_{0,CF} = C_1 \times \sqrt{(1 + CSF)} \times \sqrt{\frac{E_{pipa} \times I_{pipa}}{M_e \times L_{eff,CF}^4} \times \left(1 + \left(C_2 \times \frac{S_{eff}}{P_{E,CF}}\right) + \left(C_3 \times \left(\frac{\delta_{CF}}{D}\right)^2\right)\right)}$		Hz	f _{o,CF}	1.37
	Onset Reduced Velocity	$V_{R,onset}^{CF} = \frac{3 \times \psi_{proxy,onset} \times \psi_{mass,onset} \times \psi_{\alpha,onset}}{\gamma_{on,CF}}$			V _{R, onset} ^{CF}	3.28
	Screening Check Criteria	$\frac{f_{o,CF}}{\gamma_f} > \frac{U_c + U_w}{V_{R,onset}^{CF} \times D} \times \gamma_{CF}$	1.1895591	>	0.542	COMPLY

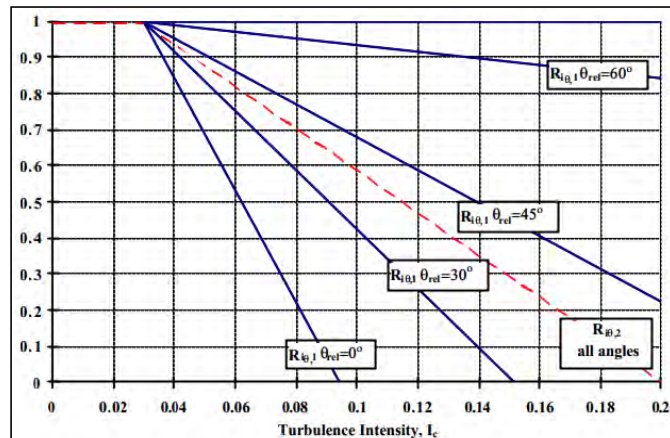
Tabel Inputan Data dan Asumsi Pada Perhitungan *Fatigue Analysis*

Parameter Perhitungan		Nilai	Satuan
Panjang Span Efektif (L_{eff})	=	20.25	m
Current Velocity (U_c)	=	0.3046246	m/s
Wave Velocity (U_w)	=	0.0229148	m/s
CSF (Concrete Stiffness Factor)	=	0.3412039	
Diameter Pipa Baja (D_s)	=	0.1683	m
Diameter Terluar Pipa (D)	=	0.2398	m
Tebal Pipa (t)	=	0.00953	m
Young Modulus (E)	=	2.07E+11	N/m ²
Current Flow Ratio (α)	=	1	Hz
Bilangan Strouhal (S)**	=	0.20	
Safety Factor untuk tegangan (γ_s)	=	1.05	
Parameter Stabilitas dalam Perancangan (K_{sd})	=	0.1479405	
Koefisien Kondisi Batas (C_4)	=	14.1	
Intensitas Turbulensi (I_c) dalam 30 menit	=	0.05	
Faktor Reduksi dari Turbulensi dan Arah Aliran ($R_{I\theta,1}$)	=	0.6895627	
Faktor Reduksi dari Turbulensi dan Arah Aliran ($R_{I\theta,2}$)	=	0.8823529	
Characteristic Fatigue Strength Constant ($\log a$)	=	11.764	
Fatigue Exponent (m)	=	3	

Note : *Berdasarkan DNV "Fatigue Strength Analysis for Mobile Offshore Unit, C-203 tahun 2005", untuk kelas D pada klasifikasi *pipelines and riser*

Note : **Berdasarkan DNV 1981 tentang *Pipeliness Design Guideliness*

Grafik Hubungan Intensitas Turbulensi (I_c) dengan Sudut Aliran



Mencari nilai fungsi reduksi ($R_{I\theta}$)

$$R_{I\theta,2} = 1.0 - \frac{(I_c - 0.03)}{0.17} ; 0 \leq R_{I\theta,2} \leq 1 = 0.882353$$

$$R_{I\theta,1} = 1 - \pi^2 \left(\frac{\pi}{2} - \sqrt{2 \times \theta_{rel}} \right) (I_c - 0.03) ; 0 \leq R_{I\theta,1} \leq 1$$

θ_{rel}	$R_{I\theta,1}$
0°	0.68956268
30°	2.21978631
37.5°	2.4004047
45°	2.56369622
60°	2.85362568

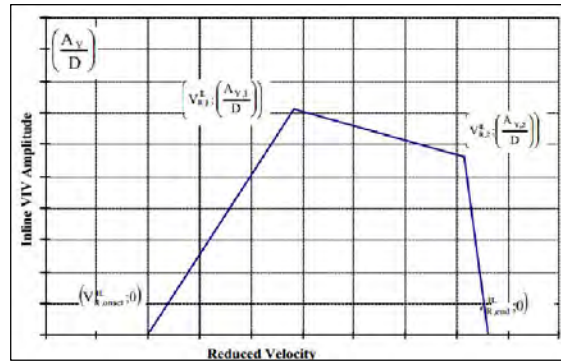
Maka :

$$R_{I\theta,1} = 0.689563$$

$$R_{I\theta,2} = 0.882353$$

note : yang nilainya diantara 0 dan 1 yang akan digunakan

Grafik Hubungan Amplitudo VIV (In-Line) dengan Reduced Velocity



Perhitungan *Reduced Velocity* berdasarkan hubungan Amplitudo VIV

No.	Rumus	Nilai	Keterangan
1	$V_{R onset}^{IL} = \begin{cases} \frac{1}{\gamma_{onL}} & \text{untuk } K_{sd} < 0 \\ \frac{0.5 + K_{sd}}{\gamma_{onL}} & \text{untuk } 0 < K_{sd} < 1 \\ \frac{K_{sd}}{\gamma_{onL}} & \text{untuk } K_{sd} > 1 \end{cases}$	= 0.90909091	$\gamma_{onL} = 11$
2	$V_{R1}^{IL} = 10 \times \left(\frac{A_{v1}}{D}\right) + V_{R onset}^{IL}$	= 0.90909091	
3	$V_{R end}^{IL} = \begin{cases} 0.5 - 0.5K_{sd} & \text{untuk } K_{sd} < 1 \\ 0 & \text{untuk } K_{sd} \geq 1 \end{cases}$	= 4.38164764	
4	$V_{R2}^{IL} = V_{R end}^{IL} - 2\left(\frac{A_{v2}}{D}\right)$	= 4.38164764	

No.	Parameter Perhitungan	Rumus	Nilai	Satuan
1	Frekuensi dari <i>Vortex Shedding</i>	$f_v = \frac{S(U_w + U_c)}{D}$	= 1.365886	Hz
2	<i>Unit Stress Amplitude</i>	$A_{IL/CF} = C_4 \times (1 + CSF) \times \frac{D \times (\phi_s - t) \times E}{L_{eff}^2}$	= 363488952	N/m ² 363 MPa
3	<i>Stress Range</i>	$S_{IL} = 2 \times A_{IL} \times \left(\frac{A_v}{D}\right) \times \psi_{dL} \times \gamma_s$	= 83064574	N/m ² 83 MPa
4	Faktor Koreksi Untuk <i>Current Flow Ratio</i>	$\psi_{dL} = \begin{cases} \frac{0.5}{\alpha - 0.5} & \text{untuk } \alpha < 0.5 \\ 1 & \text{untuk } 0.5 < \alpha < 0.8 \\ \frac{1}{U_c + U_w} & \text{untuk } \alpha > 0.8 \end{cases}$	= 1	
5	<i>Reduced Velocity*</i>	$V_R = \frac{U_c + U_w}{f_v D}$	= 1	
6	Faktor Koreksi Dari <i>Damping</i>	$R_k = \begin{cases} 1 - 0.5K_{sd} & \text{untuk } K_{sd} \geq 4 \\ 0.5 & \text{untuk } K_{sd} < 4 \end{cases}$	= 56.236665	
7	Amplitudo Maksimum Dari Respon VIV	$\left(\frac{A_{v1}}{D}\right) = \max\left(0.18 \left(1 - \frac{K_{sd}}{2}\right) R_{I01}; \left(\frac{A_{v2}}{D}\right)\right)$ $\left(\frac{A_{v2}}{D}\right) = 0.13 \left(1 - \frac{K_{sd}}{2}\right) R_{I02}$	= 0.1088192 = 0.1052783	
8	Kurva S-N	$S_{SW} = 10^{\left(\frac{\log \bar{a}_1 - \log N_{SW}}{m_1}\right)} = 10^{\left(\frac{\log \bar{a}_2 - \log N_{SW}}{m_2}\right)}$	= 83.43213	
9	Damage ratio (Berdasarkan Palmgren-Miner dengan parameter Weibull)	$D = \frac{n_0}{a} \cdot \frac{\Delta \sigma_0^m}{(\ln 10)^{m/h}} \left(1 + \frac{m}{h}\right)$	= 1.901E-08	
10	Umur Lelah	$T_{life} = \frac{T_{exposure}}{D}$	= 1.052E+09	s
			= 33.35783	tahun

Note :

h = Weibull parameter, yang didapatkan berdasarkan grafik "*long term distribution of stress range*" dari Palmgren-Miners, dalam kasus ini mengambil nilai h = 0.5

n₀ = 10⁸, di ambil berdasarkan grafik "*long term distribution of stress range*" dalam Palmgren-Miners

Δσ₀ = merupakan nilai *stress range* yang didapatkan

$$\Gamma(x+1) \cong \sqrt{2\pi x} \left(\frac{x}{e}\right)^x = \Gamma\left(\frac{m}{h} + 1\right) = 393.0365305 \quad (\text{Stirling Formula})$$

$$\Gamma(x) \cong 0.07 \exp(-\ln x) \ln x = 113.4723399 \quad (\text{Approximation of Gamma Function})$$

This run of the CFX-14.5 Solver started at 06:42:40 on 31 Dec 2014 by
user ASSUS on ASSUS-PC (intel_xeon64.sse2_winnt) using the command:

```
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v145\CFX\bin\perl\lib\cfx5solve.pl" -batch  
-ccl runInput.ccl -fullname "Fluid Flow CFX_001"
```

Setting up CFX Solver run ...

```
+-----+  
|               |  
|   CFX Command Language Upgrade   |  
|               |  
+-----+
```

Added /SIMULATION CONTROL/EXECUTION CONTROL/EXECUTABLE SELECTION/Double
Precision = Off.

```
+-----+  
|               |  
|   CFX Command Language for Run   |  
|               |  
+-----+
```

LIBRARY:

MATERIAL: Water

Material Description = Water (liquid)

Material Group = Water Data, Constant Property Liquids

Option = Pure Substance

Thermodynamic State = Liquid

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Density = 997.0 [kg m⁻³]

Molar Mass = 18.02 [kg kmol⁻¹]

Option = Value

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 4181.7 [J kg⁻¹ K⁻¹]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0.0 [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0.0 [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 8.899E-4 [kg m⁻¹ s⁻¹]

Option = Value

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 0.6069 [W m⁻¹ K⁻¹]

END

ABSORPTION COEFFICIENT:

Absorption Coefficient = 1.0 [m⁻¹]

Option = Value

END

SCATTERING COEFFICIENT:

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m⁻¹]

END

REFRACTIVE INDEX:

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m⁻¹]

END

THERMAL EXPANSIVITY:

Option = Value

Thermal Expansivity = 2.57E-04 [K⁻¹]

END

END

END

END

FLOW: Flow Analysis 1

SOLUTION UNITS:

Angle Units = [rad]

Length Units = [m]

Mass Units = [kg]

Solid Angle Units = [sr]

Temperature Units = [K]

Time Units = [s]

END

ANALYSIS TYPE:

Option = Steady State

EXTERNAL SOLVER COUPLING:

Option = None

END

END

DOMAIN: Default Domain

Coord Frame = Coord 0

Domain Type = Fluid

Location = B28

BOUNDARY: Inlet

Boundary Type = INLET

Location = Inlet

BOUNDARY CONDITIONS:

FLOW REGIME:

Option = Subsonic

END

MASS AND MOMENTUM:

Normal Speed = 0.216162741 [m s⁻¹]

Option = Normal Speed

END

TURBULENCE:

Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio

END

END

END

BOUNDARY: Outlet

Boundary Type = OUTLET

Location = Outlet

BOUNDARY CONDITIONS:

FLOW REGIME:

Option = Subsonic

END

MASS AND MOMENTUM:

Normal Speed = 0.216162741 [m s⁻¹]

Option = Normal Speed

END

END

END

BOUNDARY: Wall

Boundary Type = WALL

Location = Wall

BOUNDARY CONDITIONS:

MASS AND MOMENTUM:

Option = No Slip Wall

END

WALL ROUGHNESS:

Option = Smooth Wall

END

END

END

BOUNDARY: WallSilinder1

Boundary Type = WALL

Location = WallSilinder1

BOUNDARY CONDITIONS:

MASS AND MOMENTUM:

Option = No Slip Wall

END

WALL ROUGHNESS:

```
    Option = Smooth Wall
END
END
END
BOUNDARY: WallSilinder2
    Boundary Type = WALL
    Location = WallSilinder2
    BOUNDARY CONDITIONS:
        MASS AND MOMENTUM:
            Option = No Slip Wall
        END
        WALL ROUGHNESS:
            Option = Smooth Wall
        END
    END
END
DOMAIN MODELS:
    BUOYANCY MODEL:
        Option = Non Buoyant
    END
    DOMAIN MOTION:
        Option = Stationary
    END
    MESH DEFORMATION:
        Option = None
    END
    REFERENCE PRESSURE:
        Reference Pressure = 1 [atm]
    END
```

END

FLUID DEFINITION: Fluid 1

Material = Water

Option = Material Library

MORPHOLOGY:

Option = Continuous Fluid

END

END

FLUID MODELS:

COMBUSTION MODEL:

Option = None

END

HEAT TRANSFER MODEL:

Fluid Temperature = 25 [C]

Option = Isothermal

END

THERMAL RADIATION MODEL:

Option = None

END

TURBULENCE MODEL:

Option = SST

END

TURBULENT WALL FUNCTIONS:

Option = Automatic

END

END

END

OUTPUT CONTROL:

RESULTS:

File Compression Level = Default

Option = Standard

END

END

SOLVER CONTROL:

Turbulence Numerics = First Order

ADVECTION SCHEME:

Option = High Resolution

END

CONVERGENCE CONTROL:

Length Scale Option = Conservative

Maximum Number of Iterations = 100

Minimum Number of Iterations = 1

Timescale Control = Auto Timescale

Timescale Factor = 1.0

END

CONVERGENCE CRITERIA:

Residual Target = 1.E-4

Residual Type = RMS

END

DYNAMIC MODEL CONTROL:

Global Dynamic Model Control = On

END

END

END

COMMAND FILE:

Version = 14.5

Results Version = 14.5

END

SIMULATION CONTROL:

EXECUTION CONTROL:

EXECUTABLE SELECTION:

Double Precision = Off

END

PARALLEL HOST LIBRARY:

HOST DEFINITION: assuspc

Remote Host Name = ASSUS-PC

Installation Root = C:\Program Files\ANSYS Inc\v%v\CFX

Host Architecture String = winnt-amd64

END

END

RUN DEFINITION:

Solver Input File = Fluid Flow CFX.def

Run Mode = Full

END

SOLVER STEP CONTROL:

PARALLEL ENVIRONMENT:

Start Method = Serial

END

END

END

END

=====

Boundary Flow and Total Source Term Summary

=====

+-----+		
	U-Mom	
+-----+		
Boundary	: Inlet	-3.8978E-05
Boundary	: Outlet	-3.1404E+00
Boundary	: Wall	1.2061E+01
Boundary	: WallSilinder1	-9.0740E+00
Boundary	: WallSilinder2	1.7889E-01

Domain Imbalance :		2.5547E-02

Domain Imbalance, in %: 0.0008 %

+-----+		
	V-Mom	
+-----+		
Boundary	: Inlet	3.2773E+03
Boundary	: Outlet	-3.2285E+03
Boundary	: Wall	-1.4636E+01
Boundary	: WallSilinder1	-3.4078E+01
Boundary	: WallSilinder2	-4.2240E-01

Domain Imbalance :		-3.2784E-01

Domain Imbalance, in %: -0.0100 %

+-----+

| W-Mom |

+-----+

Boundary : Inlet -9.3724E-08

Boundary : Outlet -4.7608E-02

Boundary : Wall 5.7150E-02

Boundary : WallSilinder1 -7.2217E-04

Boundary : WallSilinder2 -1.0653E-02

Domain Imbalance : -1.8325E-03

Domain Imbalance, in %: -0.0001 %

+-----+

| P-Mass |

+-----+

Boundary : Inlet 1.1406E+04

Boundary : Outlet -1.1406E+04

Domain Imbalance : 2.5391E-02

Domain Imbalance, in %: 0.0002 %

=====

Wall Force and Moment Summary

=====

Notes:

1. Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

```
+-----+
|           Pressure Force On Walls           |
+-----+
X-Comp.   Y-Comp.   Z-Comp.
```

Domain Group: Default Domain

Wall	-1.2067E+01	0.0000E+00	-5.6477E-02
WallSilinder1	9.0792E+00	3.2720E+01	5.3433E-04
WallSilinder2	-1.7862E-01	1.7802E-03	1.0483E-02

Domain Group Totals :	-3.1663E+00	3.2722E+01	-4.5459E-02
-----------------------	-------------	------------	-------------

```
+-----+
|           Viscous Force On Walls           |
+-----+
X-Comp.   Y-Comp.   Z-Comp.
```

Domain Group: Default Domain

Wall	4.3533E-03	1.4636E+01	-6.0143E-04
WallSilinder1	-5.0338E-03	1.3581E+00	1.8734E-04
WallSilinder2	-2.2580E-04	4.2062E-01	1.5929E-04

Domain Group Totals : -9.0624E-04 1.6415E+01 -2.5480E-04

+-----+

| Pressure Moment On Walls |

+-----+

 X-Comp. Y-Comp. Z-Comp.

Domain Group: Default Domain

Wall	1.3186E+00	-1.1147E+02	-3.2210E+02
WallSilinder1	-2.7385E+02	8.4741E+01	1.1533E+02
WallSilinder2	-3.2027E-01	-1.9742E+00	-4.3653E+00

Domain Group Totals : -2.7286E+02 -2.8700E+01 -2.1113E+02

+-----+

| Viscous Moment On Walls |

+-----+

 X-Comp. Y-Comp. Z-Comp.

Domain Group: Default Domain

Wall	-1.2262E+02	4.4616E-02	-5.9545E+01
WallSilinder1	-1.1362E+01	-4.3260E-02	-5.9935E+00
WallSilinder2	-4.7487E+00	-1.9326E-03	-1.6393E+00

Domain Group Totals : -1.3873E+02 -5.7634E-04 -6.7178E+01

Locations of Maximum Residuals				
Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	163520	-4.241E+00	-2.814E+01	1.670E+01
V-Mom	163520	-4.241E+00	-2.814E+01	1.670E+01
W-Mom	163366	-4.267E+00	-2.808E+01	1.670E+01
P-Mass	6471	-4.203E+00	-2.819E+01	1.666E+01
K-TurbKE	158713	-4.258E+00	-2.813E+01	1.667E+01
O-TurbFreq	158713	-4.258E+00	-2.813E+01	1.667E+01

Peak Values of Residuals			
Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	2	2.27136E-02	9.52999E-05
V-Mom	3	5.56326E-02	7.30464E-05
W-Mom	4	3.68127E-04	1.86624E-05
P-Mass	1	7.15491E-02	6.42597E-06
K-TurbKE	1	1.71577E-01	9.64690E-05
O-TurbFreq	1	3.03583E-01	8.66018E-05

False Transient Information			
Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time	
U-Mom	Auto	3.85647E+02	
V-Mom	Auto	3.85647E+02	
W-Mom	Auto	3.85647E+02	
K-TurbKE	Auto	3.85647E+02	
O-TurbFreq	Auto	3.85647E+02	

Average Scale Information	
---------------------------	--

Domain Name : Default Domain

Global Length	= 7.3230E+00
Minimum Extent	= 3.1776E+00
Maximum Extent	= 1.6670E+01
Density	= 9.9700E+02
Dynamic Viscosity	= 8.8990E-04
Velocity	= 2.2834E-01
Advection Time	= 3.2070E+01
Reynolds Number	= 1.8734E+06

Variable Range Information

Domain Name : Default Domain

Variable Name	min	max
Density	9.97E+02	9.97E+02
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	4.18E+03	4.18E+03
Dynamic Viscosity	8.90E-04	8.90E-04
Thermal Conductivity	6.07E-01	6.07E-01
Static Entropy	0.00E+00	0.00E+00
Velocity u	-2.04E-01	2.08E-01
Velocity v	-8.54E-02	3.94E-01
Velocity w	-3.24E-02	3.03E-02
Pressure	-5.46E+01	4.18E+01
Turbulence Kinetic Energy	8.19E-06	5.59E-04
Turbulence Eddy Frequency	1.49E-01	1.86E+01
Eddy Viscosity	2.35E-03	5.90E-01
Temperature	2.98E+02	2.98E+02
Wall Scale	1.52E-05	1.31E+00
Wall Distance	9.13E-05	1.60E+00

CPU Requirements of Numerical Solution
--

Subsystem Name	Discretization	Linear Solution
----------------	----------------	-----------------

(secs. %total) (secs. %total)

```
-----
Wall Scale          3.53E+00  1.0 %   3.03E+00  0.9 %
Momentum and Mass   1.59E+02 45.9 %   3.53E+01 10.2 %
TurbKE and TurbFreq  6.21E+01 18.0 %   3.68E+01 10.6 %
-----
Subsystem Summary    2.24E+02 64.9 %   7.51E+01 21.7 %

Variable Updates     3.84E+01 11.1 %
File Reading          1.09E-01  0.0 %
File Writing          1.97E+00  0.6 %
Miscellaneous         5.90E+00  1.7 %
-----
Total                3.46E+02
```

```
+-----+
|           Job Information at End of Run           |
+-----+
```

Host computer: ASSUS-PC (PID:1648)
Job finished: Wed Dec 31 06:48:28 2014
Total CPU time: 3.457E+02 seconds

or: (0: 0: 5: 45.743)
(Days: Hours: Minutes: Seconds)

Total wall clock time: 3.457E+02 seconds
or: (0: 0: 5: 45.744)
(Days: Hours: Minutes: Seconds)

End of solution stage.

```
+-----+
| The results from this run of the ANSYS CFX Solver have been |
| written to |
| C:/Users/ASSUS/AppData/Local/Temp/WB_ASSUS-PC_5068_2/unsaved_proj- |
| ect_pending_tasks/dp0_CFX_Solution/Fluid Flow CFX_001.res |
+-----+
```

Th

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	<i>GENERAL ARRANGEMENT</i>
LAMPIRAN A1	<i>PLATFORM APPORACH</i>
LAMPIRAN A2	<i>PIPELINE CROSSING DETAIL</i>
LAMPIRAN A3	<i>PIPELINE ALIGNMENT SHEET (1)</i>
LAMPIRAN A4	<i>PIPELINE ALIGNMENT SHEET (2)</i>
LAMPIRAN A5	<i>PIPELINE ROUTE MAP/LAYOUT</i>
LAMPIRAN B	PERHITUNGAN MANUAL
LAMPIRAN B1	PERHITUNGAN KECEPATAN ARUS
LAMPIRAN B2	PERHITUNGAN ANALISIS TEGANGAN DAN ANALISIS STATIK <i>FREE SPAN</i>
LAMPIRAN B3	TABEL PERHITUNGAN ANALISIS DINAMIS <i>FREE SPAN</i>
LAMPIRAN B4	PERHITUNGAN ANALISIS FATIGUE <i>FREE SPAN</i>
LAMPIRAN C	<i>INPUT ANSYS - CFX</i>
LAMPIRAN D	<i>OUTPUT ANSYS - CFX</i>

DAFTAR PUSTAKA

- Afandi, D. 2011. Optimalisasi Perhitungan Allowable Free *Span* Jalur Pipa SSWJ Phase II. **Tugas Akhir**. PTK AKAMIGAS-STEM. Indramayu.
- American Society of Mechanical Engineers. 2000. ASME B 31.8.2000. **Gas Transmission and Distributing Piping System**. USA.
- Arif, A. 2008. Analisis Free Span Untuk Pipeline di Bawah laut. **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung
- Bai, Y. dan Qiang, B. 2001. **Subsea Pipelines and Risers**. New York: Elsevier.
- Det Norske Veritas. 1981. **Rules Of Submarine Pipeline System**. Norway
- Det Norske Veritas. 2000. **DNV-OS-F101. Submarine Pipeline Systems**. Norway.
- Det Norske Veritas. 2002. **DNV-RP-F105. Free Spanning Pipelines**. Norway.
- Det Norske Veritas. 2005 **DNV-RP-C203. Fatigue Design Of Offshore Steel Structure**. Norway.
- Dianawati. 2008. Analisis Free *Span* Pipa Bawah Laut Akibat Pengaruh Dinamika Dasar Laut Di Laut Cina Selatan. **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Guo, B. Song, S. J, Chako. J, Galambhor. 2005. **Offshore Pipeline**. New York: Elsevier.
- Kenny, J. P. 1993. **Structural Analysis of Pipelines Spans**. USA: HSE Books
- Krogstad, H. E. 2000. **Linear Wave Theory : Part A**. Norway: Norwegian University Of Science And Technology.

- Mouselli, A. H. 1981. **Offshore Pipeline Design, Analysis, and Methods**. Tulsa: PennWell Books.
- Naess, A. A. 1985. **Fatigue Handbook : Offshore Steel Structure**. Norway: Tapir.
- Ochi, M.K. 1978. **Wave Statistics for the Design pf Ships and Ocean Structure**. Transactions of SNAME Journal, Vol. 95, pp. 189-214
- Palmer, A. C. 1990. **Design of Submarine Pipelines Against Upheaval Buckling**. Offshore Technology Conference. Texas.
- Pertamina Huu Energy. 2012. **KILO Field Further Development Project**. Jakarta.
- Pratama, D. A. 2007. Analisis Free *Span* Pipa Bawah Laut Dan *Span* Remediation. **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Prayoga, D. G. S. 2013. Analisa Kelelahan Free *Span* Pada Jalur Pipa Gas Bawah Laut East Java Gas Pipeline (EJGP) Dengan Pendekatan Finite Element Method (FEM). **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Sistem Perkapalan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Puspitasari, R. 2008. Analisis Free *Span* Pipa Bawah Laut. **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Putra, S. A. 2013. Studi Kasus Pengaruh Vortex Induced Vibration Pada Free *Span* Pipa Pertamina Hulu Energi-Offshore North West Java. **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.
- Semedi, D.W. 2005. Optimasi Pipa Bawah Laut pada Lapangan Produksi Gas Tunu Kalimantan Timur. **Tugas Akhir**. Jurusan Teknik Kelautan-FTK, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
- Tawekkal, A. H. dan Krisnaldi Idris. 2010. **Desain dan Analisis Pipeline Crossing**. Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung.

Turdjail, A. R. 2008. Analisis Fatigue Pada Free *Span* Akibat Beban VIV. **Tesis**.
Jurusan Teknik Kelautan-FTSL, Institut Teknologi Bandung, Bandung.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Idham Aulia M. Basir, anak keempat dari lima bersaudara dari Ir. Muh Basir Nappu, M.Sc., dan Ir. Sulastri Sindjilala, dilahirkan 22 tahun yang lalu, tepatnya pada tanggal 21 September 1992 di Ujung Pandang, Sulawesi Selatan. Penulis menyelesaikan pendidikan formal pertamanya pada jenjang pendidikan dasar di SDN. Komp. Sambung Jawa, Makassar pada tahun 2004 dan melanjutkannya di SMP Negeri 1 Makassar hingga tahun 2007, serta menyelesaikan jenjang Pendidikan Menengahnya di SMA Negeri 11 Makassar

pada tahun 2010. Setelah lulus dari SMA, penulis merantau di pulau seberang, tepatnya di Surabaya, untuk melanjutkan mengambil jenjang Pendidikan Tinggi Strata 1 di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Selama menempuh masa perkuliahan, penulis cukup aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan dan kepanitiaan, khususnya dalam bidang keilmiahan. Dalam bidang oraganisasi kemahasiswaan, penulis pernah menjadi anggota UKM OR-AIR untuk bidang Dayung pada tahun 2010/2011, kemudian menjadi staf Kementrian Riset dan Teknologi BEM ITS periode 2011/2012 hingga (Plt) Dirjen Aplikasi Teknologi (Aptek) Kementrian Riset dan Teknologi pada periode yang sama. Prestasi yang pernah diraih oleh pria penyuka musik ini adalah Penerima Apresiasi untuk Kategori Teknologi dan Kategori Favorit pada kegiatan “SATU Indonesia Award 2014” yang diadakan oleh Astra Internasional dan Majalah Tempo, Penyaji Tingkat Nasional untuk kegiatan “PIMNAS (Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional) XXVI” pada tahun 2013 yang diadakan oleh DIKTI, Juara II “Student Innovation Competition 2013” yang diadakan oleh Teknik Kelautan, ITB, Finalis OSN-Pertamina 2013 untuk Kategori Proyek Sains Bidang Rancang Bangun, dan beberapa juara serta finalis untuk perlombaa karya tulis ilmiah nasional. Penulis

juga berkesempatan untuk melaksanakan kerja praktik selama 2 bulan di PT. Global Maritime, BSD City, Tangerang, Serpong. Selama masa studi, penulis sangat tertarik dengan bidang ahli perancangan dan produksi bangunan laut sehingga hal itulah yang mendasari penulis untuk membuat tugas akhir ini dengan fokus *offshore pipeline*. Penulis dapat dihubungi melalui [idham aulia@rocketmail.com](mailto:idham_aulia@rocketmail.com)

.